Nährelementversorgung und Wuchsleistung von Kiefernbeständen in Südbrasilien

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Forstwissenschaftlichen Fakultät
der Albert-Ludwigs-Universität
zu Freiburg im Breisgau

vorgelegt von
Carlos Bruno Reissmann
aus Pôrto Uniáo (Brasilien)
Freiburg im Breisgau, 1981

Nährelementversorgung und Wuchsleistung von Kiefernbeständen in Südbrasilien

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Forstwissenschaftlichen Fakultät
der Albert-Ludwigs-Universität
zu Freiburg im Breisgau

vorgelegt von
Carlos Bruno Reissmann
aus Pôrto Uniáo (Brasilien)
Freiburg im Breisgau, 1981

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Dekan:	Professor Dr. E. Nießlein
Leiter der Arbeit:	Professor Dr. H. W. Zöttl
Referent:	Professor Dr. H. W. Zöttl
Korreferent:	Professor Dr. W. E. H. Blum

Tag der Verkündung
des Prüfungsergebnisses:

Zum Gedenken an meinen Sohn Rodrigo.

Meinen Eltern, Heinz und Elza,
meiner Frau Liliane,
meinen Kindern, Renata und Carlos Rodolfo

gewidmet.

Gedruckt mit Unterstützung des
Deutschen Akademischen Austauschdienstes

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
Vorwort		1
1.	Einführung	2
2.	Problemstellung	3
3.	Literaturübersicht	5
3.1.	Natürliches Verbreitungsgebiet und allgemeine ökologische Bedingungen von Pinus taeda L. und Pinus elliottii ENGELM.	5
3.2.	Mineralstoffernährung	7
3.2.1.	Pinus taeda	7
3.2.2.	Pinus elliottii	8
4.	Untersuchungsgebiet	12
4.1.	Geographische Lage	12
4.2.	Geologie	12
4.3.	Böden	15
4.3.1.	Latosol-Gruppe	15
4.3.1.1.	Basalt-Latosol	15
4.3.1.2.	Sandstein-Latosol	16
4.3.1.3.	Tonschiefer-Latosol	16
4.3.2.	Gruppe der Böden mit Textur-B-Horizont	17
4.3.2.1.	"Podzólico Vermelho Amarelo"	17
4.3.2.2.	"Terra Rocha Estruturada"	17
4.3.3.	Gley-Gruppe	18
4.3.4.	Ranker-Gruppe	18
4.3.5.	"Areias Quartzosas"	18
4.4.	Vegetation	18
4.4.1.	Araukarienwald	19
4.4.2.	Sekundärwald	19
4.4.3.	Campos Gerais	19
4.4.4.	Küstenwald	20
4.5.	Klima	20

Seite

5.	Untersuchungsstandorte und Methoden	22
5.1.	Standort	22
5.1.1.	Ausgangsgestein	22
5.1.2.	Bodengruppe	22
5.1.3.	Pflanzabstand, Alter und Wuchsleistung des Bestandes	23
5.2.	Nadelprobenahme	23
5.3.	Bodenprobenahme	24
5.4.	Analysenmethoden	24
6.	Ergebnisse und Diskussion: Pinus taeda L.	27
6.1.	Makronährelemente	29
6.1.1.	Stickstoff	29
6.1.1.1.	N-Gehalt der halbjährigen Nadeln und Wuchsleistung	29
6.1.1.2.	N-Gehalt im Mineralboden und Wuchsleistung	31
6.1.1.3.	N-Gehalt der halbjährigen Nadeln, L- und F-Lage	32
6.1.2.	Phosphor	33
6.1.2.1.	P-Gehalt der halbjährigen Nadeln und Wuchsleistung	33
6.1.2.2.	P-Gehalt im Mineralboden und Wuchsleistung	35
6.1.2.3.	P-Gehalt der halbjährigen Nadeln, L- und F-Lage	36
6.1.3.	Kalium	37
6.1.3.1.	K-Gehalt der halbjährigen Nadeln und Wuchsleistung	37
6.1.3.2.	K-Gehalt im Mineralboden und Wuchsleistung	38
6.1.3.3.	K-Gehalt in halbjährigen Nadeln, L- und F-Lage	40
6.1.4.	Calcium	42
6.1.4.1.	Ca-Gehalt der halbjährigen Nadeln und Wuchsleistung	42
6.1.4.2.	Ca-Gehalt im Mineralboden und Wuchsleistung	42
6.1.4.3.	Ca-Gehalt der halbjährigen Nadeln, L- und F-Lage	44
6.1.5.	Magnesium	46
6.1.5.1.	Mg-Gehalt der halbjährigen Nadeln und Wuchsleistung	46
6.1.5.2.	Mg-Gehalt im Mineralboden und Wuchsleistung	47
6.1.5.3.	Mg-Gehalt der halbjährigen Nadeln, L- und F-Lage	49

Seite

6.1.6.	Schwefel	49
6.1.7.	Zusammenfassende Diskussion der Makronährelemente	52
6.2.	Mikronährelemente	60
6.2.1.	Eisen	60
6.2.2.	Mangan	61
6.2.3.	Zink	64
6.2.4.	Kupfer	66
6.2.5.	Bor	69
6.2.6.	Zusammenfassende Diskussion der Mikronährelemente	73
6.3.	Aluminium	75
6.3.1.	Aluminiumgehalt in halbjährigen Nadeln, Mineralboden und Beziehungen zur Wuchsleistung	75
6.3.2.	Al-Gehalt der halbjährigen Nadeln, L- und F-Lage	77
6.4.	Humusgehalt im obersten Mineralboden und Wuchsleistung	77
7.	Ergebnisse und Diskussion: Pinus elliottii ENGELM.	86
7.1.	Makronährelemente	88
7.2.	Mikronährelemente	94
7.3.	Aluminium	97
7.4.	Auflagehumus	97
7.5.	Zusammenfassende Beurteilung der Nährelementversorgung	101
8.	Vergleich Pinus taeda - Pinus elliottii	106
8.1.	Wuchsleistung	106
8.2.	Nährelementversorgung	108
9.	Zusammenfassung	111

		Seite
10.	Literaturverzeichnis	115
11.	Anhang	125
11.1	Pinus taeda	125
11.2	Pinus elliottii	139

VORWORT

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Partnerschaftsprojekts zwischen der Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg im Breisgau und der Universidade Federal do Paraná in Curitiba (Brasilien).

Als erstes danke ich Herrn Prof. Dr. Zöttl für die ständige Betreuung in allen Phasen der Arbeit und den Arbeitsplatz im Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre, ebenso Herrn Prof. Dr. Blum für die Unterstützung und Beratung während der Planung und Probenahme in Brasilien.

Der Universidade Federal do Paraná bin ich für die Beurlaubung zur Durchführung dieser Arbeit zu Dank verpflichtet. Dem Deutschen Akademischen Austauschdienst danke ich für das Stipendium; dabei bedanke ich mich herzlich bei Frau M. L. Ulrich und Frau H. Ware für ihre aufmerksame Hilfsbereitschaft.

Weiterhin danke ich den Herren Prof. Dr. Pelz und Dr. Bernauer für die Unterstützung bei den statistischen Auswertungen, Dr. H. Spiecker für die Hilfe während der Computerbenutzung bei der Datenauswertung.

Besonderen Dank schulde ich den Mitarbeitern im Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre: Herrn Dr. Hildebrand für die Beratung im Labor und die Betreuung nach meiner Ankunft, Herrn Lamparski und Herrn Trüby sowie Frl. Ricker für die Hilfe bei der Abfassung der Dissertation, Frau Oswald für die Ausführung der Zeichnungen, Frau Schlenker für die Hilfsbereitschaft bei der Analysendurchführung. Ich danke auch allen anderen Mitarbeitern herzlich für ihre Hilfe. Vor allem aber gedenke ich in tiefer Dankbarkeit Frau Vogel (+), die mir ihre unermüdliche Hilfe und ständige Unterstützung bei allen Arbeiten im Labor gewährte.

1. EINFÜHRUNG

Die Arbeit behandelt Pinus teada L. und Pinus elliottii ENGELM. var. elliottii, die beiden dominierenden Koniferen der Man Made Forests in Südbrasilien (die Staaten Paraná, Santa Catarina und Rio Grande do Sul - siehe Abb. 1) Es handelt sich durchweg um Neuaufforstungen, die seit 1966 aufgrund eines Steuererleichterungsprogrammes der brasilianischen Regierung begonnen wurden. Seitdem sind riesige Flächen mit diesen beiden Kiefernarten aus dem Südosten der Vereinigten Staaten von Nordamerika aufgeforstet worden. Allein im Staat Paraná betrug 1979 die aufgeforstete Fläche 664.575 ha. Dies entspricht einer Gesamtinvestition von rund Cr$ 5.553.660.000,-- (derzeit etwa 185 Mill. DM).+)

Pinus elliottii gehört zu den "Big Four"-Kiefern des Südostens der Vereinigten Staaten (PRITCHETT und SMITH, 1968). Diese Art ist ebenso wie Pinus taeda, die schon über 40 Jahre bei Aufforstungsvorhaben verwendet wird (FOIL und RALSTON, 1967), als raschwüchsige und robuste Art bekannt. Zur Wahl dieser beiden Baumarten trugen große Aufforstungserfolge außerhalb des Herkunftsgebietes, z.B. in Australien (BAUR, 1959), entscheidend bei.

Für die Aufforstung der entwaldeten Gebiete Südbrasiliens waren geeignete Baumarten zu suchen, um den steigenden Bedarf an Holz und Zellstoff rasch zu decken. Voraussetzung war die Verfügbarkeit ausreichender Samenmengen und Kenntnis der waldbaulichen Behandlungsmethoden. Gestützt auf die vorhandenen Kenntnisse über die Wachstumseigenschaften der beiden Baumarten ließen sich in den vergangenen Jahren beachtliche wirtschaftliche Erfolge erzielen, die auch ökologisch tolerierbar erscheinen (LADERA, 1977; GOLFARI, 1968, 1971). Trotzdem stehen noch eine Reihe ökologischer Probleme zur Lösung an. Hierzu soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag liefern.

+) Nach Information des Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF)

2. PROBLEMSTELLUNG

In Brasilien gibt es derzeit sehr wenige Untersuchungen über Nährelementhaushalt bzw. -versorgung von Aufforstungen. Hauptursache hierfür ist, daß sich die forstökologische Forschung in Brasilien erst in den 60er Jahren an den Universitäten etabliert hatte. Außerdem waren in diesen Jahren die von Regierungsseite unterstützten Aufforstungsprogramme gestartet worden. Ernährungskundliche Untersuchungen waren früher auf intensiver genutzte landwirtschaftliche Kulturen beschränkt. Im Naturwald, der im wesentlichen der Explotation diente, konnte man Probleme der Bodenfruchtbarkeit als solche von nachgeordneter Bedeutung halten.

Die ausgedehnte und intensive Aufforstungstätigkeit erfordert nun neben der Wahl geeigneter Baumarten eine hinreichende Berücksichtigung der Boden- bzw. Standortsverhältnisse. Hierbei spielen vor allem die Fragen der Nährelementversorgung eine große Rolle. Bei einer relativ kurzen Umtriebszeit von ca. 30 Jahren und einem jährlichen Derbholzzuwachs von 20 - 34 m^3/ha haben die neubegründeten Bestände einen hohen Nährstoffbedarf und verursachen bei ihrer Nutzung einen ebenfalls hohen Nährstoffentzug. Erschwerend kommt hinzu, daß die Aufforstungsgebiete überwiegend Flächen geringerer landwirtschaftlicher Produktivität bzw. "Campo"-Landschaften mit niedriger natürlicher Fruchtbarkeit darstellen. Aufforstungen unmittelbar nach dem Abtrieb des natürlichen Primärwaldes sind flächenmäßig weniger bedeutsam.

Die Erfassung der Nährelementanlieferung eines Standorts hat im Rahmen der Abschätzung der gesamten Bodenfruchtbarkeit möglichst eingehend zu erfolgen, um Mißerfolge bei Aufforstungen zu vermeiden und um Vorhersagen über die mögliche Wuchsleistung zu ermöglichen. Dabei spielen chemische Bodenanalysen und Nadelanalysen eine entscheidende Rolle.

Es ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, in Aufforstungsbeständen von Pinus taeda und P. elliottii die Zusammenhänge zwischen Nährelementvorrat bzw. -verfügbarkeit im Boden, nadelanalytisch ermitteltem Ernährungszustand und der Wuchsleistung der Bäume zu untersuchen.

Die Ergebnisse sollen Aussagen gestatten über die Fruchtbarkeit der verschiedenen Standorte, die Möglichkeiten der Verbesserung der Nährelementversorgung der Bestände und Prognosen über den Aufforstungserfolg. Damit sind sowohl praktisch bedeutsame Ergebnisse für die Forstwirtschaft und Holzindustrie zu erwarten, als auch grundlegende Erkenntnisse über die Nährstoffdynamik in subtropischen Böden.

3. LITERATURÜBERSICHT

3.1. Natürliches Verbreitungsgebiet und allgemeine ökologische Bedingungen von Pinus taeda L. und Pinus elliotti ENGELM.

Das natürliche Verbreitungsgebiet der beiden Kiefernarten liegt im Südosten der Vereinigten Staaten von Nordamerika. In diesem Raum kommen noch zwei weitere Kiefernarten vor, P. palustris MILL. und P. virginiana MILL. Man spricht daher von diesen Baumarten als den "Big Four of the Southwest" (PRITCHETT und SMITH, 1968). P. elliottii ist im Gebiet der "Lower Coastal Plain" heimisch und wächst häufig auf Böden mit mangelhafter Dränage . P. taeda breitet sich weiter nach Westen (Texas) aus und hält sich mehr auf trockeneren Standorten. Diese Art hat das größte Verbreitungsgebiet aller südlichen Kiefern (HAROLD und HOOCKER, 1956) und stellenweise xerophytische Züge (THAMES, 1963).

Die Art Pinus elliottii gliedert sich in zwei Varietäten, nämlich var. elliottii ENGELM. und var. densa LITTLE und DORMAN. Die Varietät densa kommt hauptsächlich in Südflorida vor und bleibt außerhalb der Betrachtungen vorliegender Arbeit.

Das Klima des Ursprungsgebietes der beiden Arten ist gemäßigt bis subtropisch mit deutlich maritimem Einfluß. Die Wintertemperaturen haben in den "Lowlands" in der Nähe des Golfs und in Nordgeorgia einen Mittelwert von 11 ^{o}C; sie steigen nach Südosten (Südflorida) bis 21 ^{o}C an. Die Sommertemperaturen sind ziemlich gleichmäßig. Sie schwanken zwischen 27 und 32 ^{o}C im Mittel. Die Niederschläge betragen im nördlichen Teil des Ursprungsgebietes 1100 mm/Jahr mit Maxima imFebruar und März sowie Juli und August, ansonsten aber einigermaßen gleichmäßiger Verteilung. Im Süden fallen 1600 mm/Jahr mit deutlicher Häufung in den Sommermonaten und trockener Winterperiode (SQUILLACE, 1966).

Die geologischen Verhältnisse sind von COOKE (1945) und SMITH et al. (1967) beschrieben worden (PRITCHETT und SMITH (1968). Sie unterscheiden die Standorte der "Coastal Plain" und des "Florida-Plateau", die

aus sieben Pleistozän-Formationen (meist Sand) bestehen. Neben diesen überwiegenden Tertiärsanden kommen auch rezente sandige Sedimente vor. Den geologischen Unterbau bilden Kalkgesteine. In dieser Landschaft ist die Dominanz von Pinus elliottii auf schlecht dränierten Standorten und die von Pinus taeda auf den gut dränierten zu erkennen.

Die physiographischen und klimatischen Bedingungen sind im Verbreitungsgebiet der beiden Kiefernarten ziemlich einheitlich. In Abhängigkeit vom Mikrorelief sind jedoch große Wachstumsunterschiede auf den einzelnen Standorten zu beobachten. Die Wuchsleistung variiert deutlich in Abhängigkeit von Bodenwasserhaushalt und Nährelementversorgung (PRITCHETT und SMITH, 1968; SQUILLACE, 1966).

Dabei können schon auf Entfernungen von wenigen Metern sehr große Unterschiede im Höhenwachstum auftreten. Auch RALSTON und BARNES (1965) zeigen den Einfluß von Topographie und Höhe des Grundwasserspiegels auf das Wachstum der Kiefern.

Auf flachgründigen Böden bzw. Standorten mit geringer nutzbarer Feldkapazität zeigt sich schlechtes Wachstum von Pinus elliottii. Optimal sind Standorte mit feinkörnigen Lagen (Wasserspeicherung!) in Tiefen zwischen 40 und 150 cm. Schwankungen des Grundwasserspiegels wirken deutlich negativ auf die Wuchsleistung dieser Kiefernart. In dieser Richtung fand GOLFARI (1968;1971) keine Beziehung zum Wachstum auf brasilianischen Standorten.

Pinus taeda ist wie schon erwähnt, in ihrem Vorkommen an die gut dränierten Standorte gebunden. Andererseits muß nach ZAHNER (1962) der Boden ausreichend feinkörnig sein, mindestens 35 % Ton im Unterboden erreichen. Auf weniger entwickelten Böden steigt die Wuchsleistung von Pinus taeda mit zunehmendem Gehalt an Ton und Schluff bis zu einem Wert von 65 % an (ZAHNER, 1958).

Die Wuchsleistung von P. elliottii ist nach Beobachtungen von LINNARTZ (1963) in Florida sehr hoch auf Böden mit feinkörnigem Unterboden (Wasserspeicherung!) und sandigem, durchlässigem Oberboden. Dies steht

Einklang mit den Befunden von RALSTON und BARNES (1955), die ebenfalls auf einen ausreichend tiefgründigen Wurzelraum und guten Feuchtigkeitsnachhalt in tieferen Lagen hinweisen.

Die pH-Werte der von beiden Kiefernarten bestockten Böden liegen zwischen 3,8 und 5,6.

3.2. Mineralstoffernährung

Aus einer Reihe von Publikationen über den Ernährungszustand und Düngungseffekte in Beständen der beiden Kiefernarten lassen sich wichtige Schlüsse auf ihr Verhalten in den Anbaugebieten in den Südstaaten von Brasilien ziehen.

Es zeigt sich, daß neben dem Wasser- und Lufthaushalt der Böden vor allem das Angebot von Stickstoff und Phosphor dominierenden Einfluß auf die Wuchsleistung hat. Insgesamt ist allerdings zu sagen, daß beide Pinus-Arten auch bei relativ geringem Närstoffangebot noch eine ziemlich gute Wuchsleistung zeigen (FOWELS und KRAUS, 1959). Außerdem ist Pinus taeda als Pionierbaumart bekannt, die in aufgelassene Äcker eindringt. Dies geht auch aus dem einheimischen Namen Loblolly pine hervor, der "Old-Field Pine" bedeutet.

3.2.1. Pinus taeda

Wie schon erwähnt, ist neben dem Einfluß von Wasser- und Luftversorgung im Bodenraum (LINNARTZ, 1963; ZAHNER, 1968) die Versorgung mit Phosphor eine entscheidende Größe. Mangelhafte P-Versorgung auf sehr sauren Böden konnte durch Kalk- und Phosphatgaben behoben werden. Nach McCARTHY und DAVEY (1976) ließen sich in Düngungsversuchen Steigerungen der Wuchsleistungen von bis zu 234 % erreichen. Dabei stieg der P-Gehalt in den Nadeln nicht über 1,2 mg/g an. Pinus taeda ist also

offenbar relativ genügsam im Hinblick auf die P-Versorgung.

Aufforstungen mit Pinus taeda in Südcarolina auf erodierten armen Böden ließen hauptsächlich Stickstoffmangel erkennen (van LEAR und GOEBEL, 1976). Junge, noch nicht durchforstete Bestände zeigen folgende Werte:

mg/g T.S.				
N	P	K	Ca	Mg
10,5	1,0	3,8	3,8	0,9

Nach WELLS (1968) liegt für Pinus taeda im Alter von 8 Jahren der Grenzwert des Mangelbereichs für Stickstoff bei 11,6 mg/g. Für Magnesium gibt SUCOFF (1961) als Grenzwert ausreichender Versorgung 0,8 mg/g an. In Gefäßversuchen beobachteten FOWELLS und KRAUSS (1959) optimale Wuchsleistungen bei Konzentrationen der Nährlösungen von 25 - 100 ppm N. Schlechtwüchsige Sämlinge mit Mangelsymptomen resultierten bei 1 - 5 ppm N in der Nährlösung. Die für optimales Wachstum erforderliche P-Konzentration liegt zwischen 1 und 25 ppm; Mangelerscheinungen zeigten sich bei Konzentrationen von 0,1 - 0,5 ppm P in der Nährlösung. Mangelsymptome der Nadeln waren begleitet von Werten für N unter 12 mg/g und P unter 1,0 mg/g. Gutwüchsige Bestände auf jungen vulkanischen Böden in Tanganyika haben folgende Werte (WAIL et al. 1961):

mg/g T.S.						ug/g T.S.			
N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Fe	Cu	B
17	1,5	7,5	2,9	0,9	1,6	187	43	5	15

3.2.2. Pinus elliottii

Diese Kiefernart hat offenbar relativ geringe Nährelementansprüche, weshalb Düngungserfolge nur auf extremen Mangelstandorten zu beobachten sind. Auf den bislang untersuchten Standorten wurden keine positiven Effekte von Düngung mit Kalium, Eisen, Kupfer, Mangan, Zink, Bor und Molybdän festgestellt (PRITCHETT und ZWINFORD, 1961). Nach diesen Autoren sind folgende Nadelspiegelwerte bei 15-jähriger P. elliottii zu

beobachten:

	mg/g T.S.			
N	P	K	Ca	Mg
7,66	0,75	3,33	1,55	1,29

Düngung mit P und N führten hingegen häufig zu deutlichen Steigerungen der Wuchsleistungen (PRITCHETT, 1963). Dies gilt vor allem für Standorte mit abgeräumtem Oberboden (McGREGOR und GOEBEL, 1968).

PRITCHETT und SMITH (1968) berichten von Pinus elliottii-Beständen auf Quarzsand-Böden mit sehr geringen Nährelementvorräten ohne jegliche Mangelsymptome. Bezüglich des pH-Wertes und des Calcium-Gehaltes des Bodens ist Pinus elliottii sehr tolerant.

Bei den in Australien seit vielen Jahrzehnten durchgeführten Aufforstungen von Pinus elliottii zeigten sich Probleme bei der Phosphorernährung (BENGSTON und VOIGT, 1962). Es ergaben sich klare Beziehungen zwischen dem Phosphorgehalt des Bodens und dem Phosphorgehalt der Nadeln. Nach BAUR (1959) enthielten die Kiefern auf armen Böden mit 36 ug/g P (total) in den Nadeln 0,4 mg/g P; bei Bodenphosphorgehalten von 166 ug/g erreichten die Nadeln einen Gehalt von 0,7 mg/g P. Vergleichende Untersuchungen über die P-Bedürftigkeit von Pinus elliottii und Pinus taeda ließen die geringeren Ansprüche von P. elliottii erkennen (BAUR, 1959). Dabei dürfte die im Oberboden intensivere Durchwurzelung von Pinus taeda (BILAN, 1968) eine Rolle spielen. Nachfolgende Tabelle zeigt deutlich das unterschiedliche Verhalten der beiden Kiefernarten in Abhängigkeit von der P. Versorgung.

P im Boden ug/g T.S.	P in P. taeda Nadeln ug/g T.S.	P in P. elliottii Nadeln ug/g T.S.
22	514	262
26	426	340
51	609	376
89	592	386
80	611	423
131	776	490

Tabelle 1: Vergleich der P-Gehalte in den Nadeln von Pinus taeda und Pinus elliottii in Abhängigkeit vom P-Gehalt (Salzsäureaufschluß) des Bodens (nach BAUR, 1959)

Aufgrund dieser Untersuchungen gelten in Australien 70 ug/g Gesamt-P im Boden als unterste Grenze für erfolgreiche Aufforstungen mit Pinus elliottii. Dem entsprechen P-Gehalte in den Nadeln von Pinus taeda mit 700 ug/g von Pinus elliottii mit 575 ug/g. Es verdient Beachtung, daß PRITCHETT und SMITH (1968) und PRITCHETT (1979) diese P-Spiegelwerte noch als mangelhaft betrachten und erst Werte über 900 ug/g als ausreichend gelten lassen. Diese Ansicht wird gestützt durch zahlreiche Düngungsversuche mit positiver P-Wirkung. Allein im Zeitraum 1970/75 wurden in den USA 100.000 ha mit P gedüngt (BALLARD und PRITCHETT, 1975a).

In Brasilien gibt es erst wenige Untersuchungen über die Mineralstoffernährung von Pinus elliottii. Van GOOR (1965) konnte keine Beziehungen zwischen Bodentyp und Wuchsleistung von Pinus elliottii feststellen. Die Vegetation bzw. Nutzungsart vor der Aufforstung beeinflußt jedoch die Wuchsleistung der Kiefern. Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus USA und Australien fand van GOOR keine Beziehungen zwischen der Versorgung mit P und N und dem Wachstum. Seine Analysen ergaben folgende Werte für die halbjährigen Nadeln von P. elliottii.

	mg/g T.S.				ug/g T.S.				
N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B
13,3	1,00	5,50	2,50	1,00	147	320	37	4,3	12,1

Positive Korrelationen ergaben sich aber zwischen der Summe des austauschbaren Ca und Mg im Oberboden und der Wuchsleistung.

GOLFARI (1971) erhielt keine Beziehung zwischen der Gründigkeit des Bodens und dem Wachstum von Pinus elliottii, wenn ausreichende Niederschlagsmengen das ganze Jahr hindurch gegeben sind. In Klimaten mit Trockenperioden (Cwa-Klima im Gebiet von Sao Paulo) sinkt die Wuchsleistung von Pinus elliottii auf geringe Werte ab (GOLFARI, 1968/1971). Sie erreicht dort nur 9 m^3/Jahr/ha (GURGEL, FILHO, 1965/1966). Dem stehen gegenüber Wuchsleistungen in den USA von 14 m^3/Jahr/ha (PRITCHETT und SMITH, 1968) oder von 34 m^3/Jahr/ha in bestimmten Anbaugebieten Brasiliens (FUPEF, 1977). Auf trockenen Standorten macht sich bei Pinus elliottii zusätzlich Bormangel bemerkbar (van GOOR, 1965).

Extrem geringe Nährelementgehalte werden von PRITCHETT und LLEWELLYN (1966) angegegen. Es handelt sich um 2-jährige Sämlinge auf ungedüngten, sandig-lehmigen Böden.

mg/g T.S.					ug/g T.S.			
N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	B
12,9	0,60	2,70	1,80	1,30	74	65	5,0	29

Nach PRITCHETT (1979) gelten folgende Werte in den halbjährigen Nadeln als Richtlinien für den kritischen Bereich bei P. elliottii:

mg/g T.S.					
N	P	K	Ca	Mg	S
10,0-12,0	0,85-0,90	2,5-3,0	1,3-1,6	0,4-0,8	0,8-1,0

ug/g T.S.				
Fe	Mn	Zn	B	Cu
15-35	50-100	20-50	4-8	2-4

4. UNTERSUCHUNGSGEBIET

4.1. Geographische Lage

Die Probeflächen liegen in den drei südlichen Staaten Brasiliens: Paraná (PR), Santa Catarina (SC) und in Rio Grande do Sul (RS). Sie verteilen sich auf 7 Bezirke, deren Lage aus Abb. 1 hervorgeht.

Die 19 Probeflächen mit Pinus taeda befinden sich ausschließlich im Bezirk 7 (Telêmaco Borba-PR). Die 32 Probeflächen von P. elliottii verteilen sich auf die Bezirke 1- 6. Mit Ausnahme des Bezirkes 1 liegen alle Standorte zwischen 25 und 30° südlicher Breite. Die Probeflächen repräsentieren somit den südlichen subtropischen Teil Brasiliens.

4.2. Geologie

Im geologischen Aufbau stellt der Untersuchungsraum eine Schichtstufenlandschaft dar mit nach Osten orientierten Randstufen. Diese Landschaftsgliederung ist im Staat Paraná besonders schön ausgeprägt, setzt sich aber in die südlichen Staaten fort. Der geologische Querschnitt durch den Staat Paraná (Abb. 2) zeigt unmittelbar westlich der Serra do Mar die erste Hochfläche auf überwiegend kristallinem Grundkörper. Die anschließende zweite Hochfläche ist durch devonische Sedimente des Paläozoikums und Gondwana-Schichten gekennzeichnet (MAACK, 1947). Auf diesem "Planalto" liegen die meisten Probeflächen in den dort sehr verbreiteten Aufforstungen. Die westlich anstoßende dritte Hochfläche wird hauptsächlich aus Trapp-Ergußgestein gebildet. Ihre Abgrenzung erfolgt durch die Trias-Jura-Randstufe, deren Höhe zwischen 1000 und 1200 m liegt. Als bemerkenswerte Phänomene der nachtriassischen Periode erscheinen Lakolithe aus basischen Eruptivgesteinen. Diese Lakolithe bestehen überwiegend aus Diabas, während mit den Trapp-Decken Basalte und Melaphyre verbunden sind (BIGARELLA, 1954).

Abb. 1: Lage der Probeflächen-Bezirke in Süd-Brasilien.
(1) - Passo Fundo; (2) - Sao Francisco do Sul; (3) - Tres Barras;
(4) - Ponte Alta do Norte; (5) - Irati; (6) - Ponta Grossa;
(7) - Telêmaco Borba

—.—.—.—.—. : Nördliche Grenze für Pinus elliottii- und Pinus taeda-Anbau in Südbrasilien nach GOLFARI, (1968/1971)

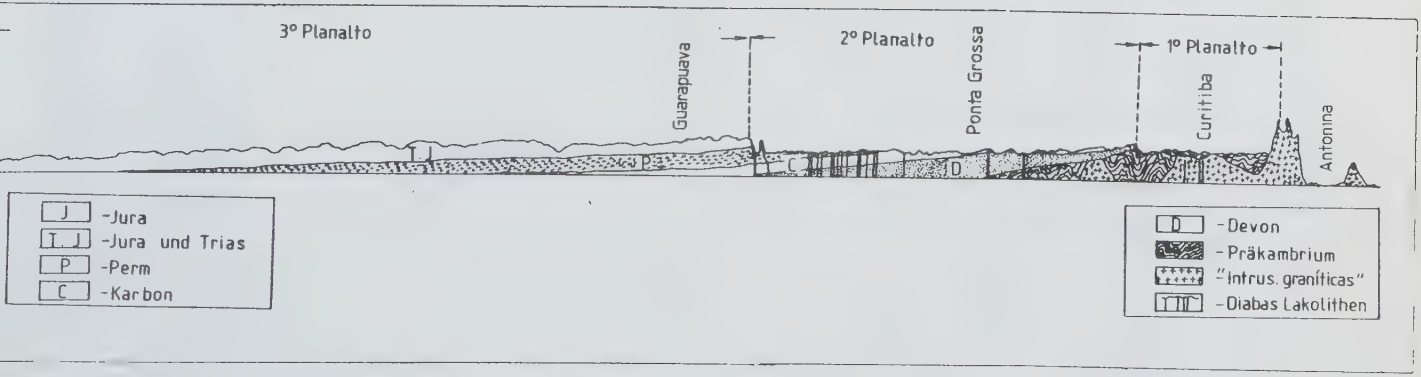

Abb. 2: Geologisches (W-O) Profil durch Paraná nach MAACK (BIGARELLA, 1954)

Die genannten Hochflächen lassen sich in ihrer Verlängerung auch durch den Staat Santa Catarina verfolgen. Sie enden in Rio Grande do Sul.

Im Gegensatz zu der Konzentrierung den Probeflächen auf den zweiten Planalto in Paraná, verteilen sich die Probeflächen in Santa Catarina auf drei verschiedene geologische Gebiete: zweiter und dritter Planalto sowie rezente Sedimente im Küstenbereich. In Rio Grande do Sul liegen die Probeflächen auf den Ausläufern der dritten Hochfläche.

4.3. Böden

Die Böden des Untersuchungsgebietes lassen sich in 4 Hauptgruppen unterteilen (vgl. LEPSCH, 1973; EQUIPE DE PEDOLGICA E FERTILIDADE SOLO, 1970), DIVISAO DEPESQUISA PEDOLOGICA (1972); CENTRO DE PESQUISAS PEDOLOGICAS (1974). Diese Klassifikation ist durch das amerikanische System des SOIL SURVEY STAFF (1960, 1967) beeinflußt.

4.3.1. Latosol-Gruppe

Gut dränierte Böden, A-B-C-Profil mit geringen Differenzierungen zwischen den Horizonten. Hauptmerkmale im B-Horizont zu beobachten: Mächtigkeit zwischen 1,50 m - 4,00 m Tongehalt gleich bis etwas höher als im A-Horizont. Krümelgefüge mit lockerer Aggregierung, keine Tonhäutchen. Alle Latosole des Untersuchungsgebietes gehören zu dieser Gruppe.

4.3.1.1. Basalt-Latosol

Diese Böden treten in den Bezirken 1 und 4 auf. Im Bezirk 1 werden sie nach dem Levantamento do Solos do Estado do Rio Grande do Sul BRASIL, (1973) als "Latossol Vermelho Escuro, fase argilosa" beschrieben. Die

Böden von Bezirk 4 sind als "Latossol Bruno Distrófico" eingestuft (SANTA MARIA, 1973). Es sind tiefgründige, gut dränierte, bröckelige Böden mit geringer Fruchtbarkeit und niedrigem pH-Wert. Die auffällige Rotfärbung ergibt bei den Böden von Bezirk 1 Farbwerte zwischen 2,5 und 5,0 YR, von Bezirk 4 Werte um 10 YR im A-Horizont. Dieser Horizont hat hier einen höheren Anteil an organischer Substanz, was auf klimatische und vegetationsbedingte Differenzierung zurückzuführen ist.

4.3.1.2. Sandstein-Latosol

Sie sind aus "Arenito Fluvio-Glacial" entwickelt, einem Sandstein des Karbon, der die "Formaçao Ponta Grossa" bildet (MAACK, 1947; BIGARELLA, 1954). Diese Böden sind hauptsächlich in den Bezirken 6 und 7 zu finden. Dort sind sie als "Latossol Vermelho Escuro textura média" beschrieben (Da ROCHA - mündliche Mitteilung, EQUIPE DE PEDOLOGIA E FERTILIDADE DO SOLO, 1970). "Textura média" bedeutet eine Körnung mit 12 - 35 % Ton.

4.3.1.3. Tonschiefer-Latosol

Diese Böden treten im Bezirk 5 auf und haben als Muttergestein "Argilito do grupo Passa Dois" (De HOOG, 1973). Dieses Gestein ist nach MAACK (1947) dem Perm zuzuordnen und besteht aus mehreren Lagen von Ton- und Bitumen-Schiefern. Es handelt sich um tiefgründige, Al-stabilisierte Latosole (BLUM und HILDEBRAND, 1977).

4.3.2. Gruppe der Böden mit Textur-B-Horizont

4.3.2.1. "Podzólico Vermelho Amarelo"

Diese Böden sind in den Bezirken 3, 5 und 7 zu finden. Für Bezirk 3 liegt eine Beschreibung als "Podzólico Vermelho Amarelo var. Piracicaba" vor (De HOOG, 1973; De HOOG und DIETRICH, 1979). Wie schon erwähnt, haben diese Böden im allgemeinen eine auffallende Horizontdifferenzierung. Der Tongehalt des B-Horizontes ist wesentlich höher als der des A-Horizontes. "Bleichhorizonte" können auftreten (VIEIRA, 1973). Aus dem Raum Sáo Paulo sind 6 Varietäten dieses Bodentyps beschrieben, die teilweise lithogen bestimmt sind (LEPSCH, 1973).

In Nord-Paraná, nördlich des Bezirks 7, wurden weitere Varietäten beschrieben (EQUIPE DE PEDOLOGIA E FERTILIDADE DO SOLO, 1970). In Abhängigkeit vom Relief besitzen diese Böden manchmal Pseudogleyerscheinungen im B-Horizont (BLUM und HILDEBRAND, 1977). Eine Aufteilung der Probeflächen auf die ausgeschiedenen Varietäten ist in dieser Arbeit nicht möglich. Es wird daher nur die Zuordnung zum Bodentyp vorgenommen.

4.3.2.2. "Terra Rocha Estruturada"

Dieser Bodentyp findet sich im Bezirk 7, hauptsächlich auf Diabas. Sein Vorkommen auf basischen Gesteinen ist charakteristisch (EQUIPE DE PEDOLOGIA E FERTILIDADE DO SOLO, 1970). Die Fruchtbarkeit ist hoch; der pH-Wert liegt zwischen 5,5 und 6,5. Auffällig ist der gut strukturierte B-Horizont mit deutlichen Tonhäutchen. Ebenso wie beim "Podsólico vermelho amarelo" handelt es sich hier um einen typischen "argilic horizon" (SOIL SURVEY STAFF, 1960, 1967).

4.3.3. Gley-Gruppe

Es handelt sich um hydromorphe Böden in Niederungen mit deutlichem Wassereinfluß im Profil. Die Ausbildung der Oxidations-Reduktions-Horizonte steht in Abhängigkeit von den Schwankungen des Grundwasserspiegels. Ausgangsgestein sind Fluvialsedimente des Quartärs. Infolge ihrer Hydromorphie werden diese Böden nur wenig landwirtschaftlich genutzt (SERVICO NACIONAL DE LEVANTAMENTO E CONSERVACAO DE SOLOS, 1976). Sie stehen daher der Aufforstung besonders mit Pinus elliottii zur Verfügung.

4.3.4. Ranker-Gruppe

Diese Ranker (A-C-Profil) sind auf Diabas, Basalt und Tonschiefer entwickelt. Das Vorkommen dieser "solos litólicos" ist auf kleinere und verstreute Gebiete beschränkt (BRASIL, 1973). Manche sind sehr flachgründig besonders der Diabas Ranker mit 0,30 m Gründigkeit.

4.3.5. "Areias Quartzosas"

Diese Böden sind aus Sedimenten des Quartärs bzw. Dünensand im Küstenbereich entwickelt. Sie sind relativ tiefgründig und sehr durchlässig. Die Horizontfolge ist A-C, wobei die Differenzierung gering ist. Der A-Horizont ist infolge höheren Humusgehalts dunkler gefärbt. Diese Böden decken 2,2 % des Staats Santa Catarina (SANTA MARIA, 1973). Sie werden gegenwärtig stark für die Forstwirtschaft benutzt (SANTA MARIA, 1973; EMBRAPA/IAPAR, 1977).

4.4. Vegetation

Im Untersuchungsgebiet kommen 4 Assoziationsgruppen (Formationen) vor.

4.4.1. Araukarienwald

Dieser Typ ist nach KLEIN (1960) keineswegs homogen, sondern besteht aus einer Reihe von Assoziationen mit verschiedenen charakteristischen Begleitbaumarten. Geschlossene Wälder sind heute sehr selten; vielfach sind nur noch kleine Waldstücke in die Campos eingestreut. Es ist die charakteristische Vegetation der südlichen Hochfläche.

Als Begleitbaumarten von Araucaria angustifolia sind zu nennen: Ocotea porosa, Cedrella fissilis, Ilex paraguariensis, Podocarpus Lambertii, Balfourodendron Riedelianum, Campomanesia xantocarpa, Ocotea arechevalateae, Chordia trychotoma, Cabralea sp., Myrcine sp. Weiterhin sind Vertreter der Myrtaceae und Palmaceae zu nennen.

4.4.2. Sekundärwald

Es dominiert Bracatinga (Mimosa scabrella) um so stärker je mehr landwirtschaftliche Zwischennutzung nach der Rodung des Primärwaldes stattgefunden hat. Diese Leguminose tritt als Pionierart häufig in ziemlich reiner Form auf (Formaçao Bracatinga). In ehemaligen Rodungsgebieten, in denen weniger intensiv mit Feuer gearbeitet wurde, bildet sich ein stärker gemischter Sekundärwald mit Cupania sp., Myrcine sp., Fagara sp., und Ilex sp., dazu mehrere Myrtaceae. Immer aber ist Bracatinga mitbeteiligt.

4.4.3. Campos Gerais

Es sind natürliche waldfreie Gebiete, die große Teile Südbrasiliens ausmachen. Gramineen dominieren. Marginal kommt Araukarienwald und subtropischer Laubwald vor. Auf kleinflächigen Standorten mit besserer Wasserversorgung beobachtet man kleine Formationen von Araukarienwäldern bzw. deren Reste. Sie sind von MAACK (1968) als Quellkopfwälder beschrieben.

4.4.4. Küstenwald

Der Küstentieflandwald im südlichsten Brasilien ist ziemlich reich an Arten; andererseits ist seine ökonomische Bedeutung für die Holzindustrie gering. Der Wald stockt auf stabilisierten Dünen und Restinga-Riffen. Es handelt sich um eine xerophytische Vegetation (MAACK, 1968) mit Arten der Myrtaceae, Euphorbiaceae, Melastomataceae, Myrcinaceae und Cactaceae. Hinter den Dünen findet sich eine Mischung von xero- und hydrophytischer Vegetation mit Baumarten, die auch forstwirtschaftlich interessant sind (Tabebuia cassiniodes und Euterpe edulis). Weitere charakteristische Arten sind Lantana ondulata, Ternstonia brasiliensis, Bombax cyathophorum, Ilex microdonta, Talauma ovata und Cecropia adenopus.

4.5. Klima

Das Klima des Untersuchungsgebietes gehört zum Cfb-Typ nach KÖPPEN (MAACK, 1968). Bemerkenswert ist die Zahl der Frosttage; nach MAGNANINI (1963) haben die Bezirke 1, 3, 4, 5 und 6 bis 25 Frosttage, während im Bezirk 7 10 und im Bezirk 2 nur bis 5 Frosttage pro Jahr auftreten. Weitere charakteristische Daten gibt Tabelle 2.

Tabelle 2: Höhenlage, Klimadaten (nach GOLFARI, 1971) und frühere Vegetation der einzelnen Bezirke im Untersuchungsgebiet

Bezirk	Höhenlage m ü. NN	Niederschlag mm	Jahresmitteltemp. °C	Mittlere Temp. d. kältesten Monats °C	Mittlere Temp. d. wärmsten Monats °C	absolute Minima °C	frühere Vegetation
Passo Fundo-RS (1)	676	1658	17,5	12,5	22,3	-5,5	Campo
Ponte Alte do Norte-SC (4)	1040	1685	15,3	10,8	19,4	-10,0	Campo und Araukarien
Tres Barras-SC (3)	780	1346	16,5	12,0	20,0	-12,0	Campo und Araukarienwald
São Francisco do Sul-SC (2)	43	1827	20,6	16,6	24,3	2,6	Küstenwald
Irati-PR (5)	885	1442	17,2	-	-	-	Campo und Araukarienwald
Ponta Grossa-PR (6)	868	1402	17,7	13,5	21,5	-6	Campo
Telêmaco Borba-PR (7)	950	1412	17,2	13,1	21,6	-4	Campo und Araukarienwald

5. UNTERSUCHUNGSSTANDORTE UND METHODEN

Mit der Verteilung der untersuchten Probeflächen sollten repräsentative Standorte im Hauptaufforstungsgebiet in den drei südlichen Staaten Brasiliens erfaßt werden. Diese Standorte liegen alle innerhalb des Gebietes, das nach GOLFARI (1968/1971) ökologisch für den Anbau der Kiefernarten in Frage kommt. Die Abgrenzung dieses Gebietes geht aus Abb. 1 hervor.

5.1. Standort

Für jeden Untersuchungsstandort wurden folgende Daten erhoben: Ausgangsgestein, Bodengruppe, Pflanzabstand, Alter und Wuchsleistung des Bestandes.

5.1.1. Ausgangsgestein

Als Grundlage dienten die geologischen Karten. Ihre Angaben wurden am Standort überprüft. Die vorkommenden Ausgangsgesteine sind in Tab. 4 aufgenommen.

5.1.2. Bodengruppe

Die Ansprache erfolgt nach der brasilianischen Bodenklassifikation (vgl. LEPSCH, 1973; EQUIPE DE PEDOLOGICA E FERTILIDARE DO SOLO, 1970, DIVISAO DEPESQUISA PEDOLOGICA, 1972; CENTRO DE PESQUISAS PEDOLOGICAS, 1974; SERVICO NACIONAL DE LEVANTAMENTO E CONSERVACAO DE SOLOS, 1976). Eine nähere Charakterisierung wurde in Kap. 4.3. gegeben.

5.1.3. Pflanzabstand, Alter und Wuchsleistung des Bestandes

Zur Ausschaltung etwaiger Einflüsse von unterschiedlichem Pflanzabstand oder Alter des Bestandes (RALSTON und PRINCE, 1963) wurden nur Probeflächen mit gleichem Pflanzabstand und Alter ausgewählt. Die untersuchten Bestände haben einheitliche Pflanzabstände (P. taeda 2, 5 m x 2, 5 m, P. elliottii 2 m x 2 m). Nach den vorhandenen Unterlagen wurden sie alle vor 8 Jahren begründet. Dabei können geringe Unterschiede im Alter der Pflanzen bestehen (ungefähre Angabe der Monate des Pflanzenalters).

Als Maßstab für die Wuchsleistung der Bestände dient die mittlere Oberhöhe der 100 stärksten Bäume pro Hektar (h_{100}). Zu ihrer Ermittlung wurden von allen Bäumen einer jeweils 600 m^2 großen Probefläche die Brusthöhendurchmesser mit dem Maßband gemessen. Von den 6 stärksten Bäumen der Probefläche (entsprechend 100 Bäumen/ha) wurden die Höhen mit dem Blume-Leiß-Höhenmesser bestimmt und das arithmetische Mittel der Werte gebildet. Dieses Verfahren hat sich zur Bestimmung der Wuchsleistung von Aufforstungsbeständen bewährt (HILDEBRAND et al. 1976; BLUM und HILDEBRAND, 1977; FUPEF, 1977).

5.2. Nadelprobenahme

Eine Vielzahl von Faktoren beeinflussen den Nährelementgehalt der Nadeln: Boden, Klima, Baumalter, Nadelalter, Position und Exposition der Nadeln in der Krone, Gesundheitszustand und genetische Faktoren (WHITE, 1954; TAMM, 1955; WELLS und METZ, 1963; GOOR, 1965; WILDE et al., 1966; PRITCHETT, 1968; BAULE und FRICKER, 1970; ZÖTTL und TSCHINKEL, 1971; FIEDLER, NEBE und HOFFMANN, 1973; LEAF, 1973; HILDEBRAND et al., 1976).

Zur Herausschälung des Faktors Boden, d. h. Nährelementanlieferung, wurde versucht, die übrigen Faktoren soweit wie möglich konstant zu halten. Beerntet wurden je 15 herrschende Bäume pro Probefläche, entnom-

men jeweils die Nadeln des jüngsten Jahrganges vom zweiten obersten Wirtel in Nordexposition (ZÖTTL und TSCHINKEL, 1973). Aus dem Nadelmaterial wurde eine Mischprobe pro Versuchsfläche gebildet. Der Zeitpunkt der Probenahme lag zwischen 24. 4. und 30. 5. 1977; zeitlich beginnend mit den Probeflächen größter Meereshöhe bzw. südlichster geographischer Breite. Auf diese Weise sollte eine Probenahme während der Ruheperiode Herbst-Winter gewährleistet werden (TAMM, 1955; WELLS, 1965).

5. 3. Bodenprobenahme

Auf jeder Probefläche wurde ein repräsentatives Bodenprofil geöffnet. Die beiden obersten Mineralbodenlagen wurden in Mächtigkeiten von je 5 cm entnommen, von 10 - 60 cm Tiefe erfolgt die Entnahme in einer Mächtigkeit von jeweils 10 cm. Aus der L-Lage und der H-Lage wurden je 15 Einzelproben entnommen. Diese Einzelproben wurden jeweils zu einer Mischprobe, repräsentativ für die L- bzw. H-Lage, vereinigt.

Zur Rationalisierung der Analysenarbeit wurden dann Mischproben aus aliquoten Anteilen der Proben aus den obersten 20 cm des Mineralbodens hergestellt. Die später zu besprechenden Ergebnisse beziehen sich durchweg auf diese Mischprobe aus 0 - 20 cm Oberboden. Diese Bodentiefe kann nach den Beobachtungen in den untersuchten jungen Beständen durchgehend als Hauptwurzelhorizont aufgefaßt werden.

5. 4. Analysenmethoden

Die Nadel- und Streuproben wurden im Labor bei 70° im Umlauftrockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet (FOWELS und KRAUS, 1959; SCHOPMEYER, 1961; RALSTON und PRINCE, 1963; VOIGT, 1968; McCARTY und DAVEY, 1976). Danach erfolgte pulverfeines Mahlen und Aufbewahrung in luftdichten Gefäßen.

Die Bodenproben wurden 2 mm gesiebt, anschließend laut Tab. 3 weiter verarbeitet.

Die chemische Analyse des getrockneten und gemahlenen Materials erfolgt an Proben von 1 g Trockensubstanz. Der Gesamtaufschluß wurde durchgeführt in Porzellantiegeln mit 5 ml 20 %er HNO_3, Erhitzen auf 500°, Aufnehmen in 10 ml 10 %er HCl und Auffüllen auf 100 ml. Aus dieser Aufschlußlösung wurden folgende Bestimmungen durchgeführt:

Tabelle 3: Probenvorbehandlung und chemische Verfahren

Bodenvorbereitung	Chemische Verfahren	Trocknung
2 mm Siebung	pH, Citronensäureextraktion (P, K, Ca, Mg)	Luft
Feinerde (gemörsert)	N, C, Gesamtaufschluß (P, K, Ca, Mg, B, Cu, Fe, Mn, Zn und AL)	105° C

1. Spektrometrische Bestimmung durch Atomabsorption (Modell 403 der Firma Perkin-Elmer).
   K in Emission bei oxidierender Luft-Azetylen-Flamme;
   Ca und Mg nach Verdünnung 1 : 10 und Zusatz von 1 %er $LaNO_3$-Lösung in Absorption in reduzierender Luft-Azetylen-Flamme WELLS (1975);
   Fe und Mn durch Absorption in oxidierender Luft-Azetylen-Flamme;
   Cu mittels flammenloser Atomabsorption in Graphitrohrküvette (HGA 74 des Modells 400 Perkin-Elmer). Zur Vermeidung von Störungen durch Matrixeffekte wurde die Additionsmethode angewandt HEIN und SCHRADER (1975/1976) und WELZ (1975).
   Al wurde in Lachgas-Azetylen-Flamme (Absorption) gemessen nach WELZ(1975).

2. Kolorimetrische bzw. turbidimetrische Bestimmung im Photometer (Modell 55 Firma Perkin-Elmer/Coleman). P als blauer Molybdatkomplex.

3. Getrennte Analysengänge erfolgten zur Bestimmung der folgenden Elemente:

B: trockener Aufschluß bei stufenweise erhöhter Temperatur von 150° C - 500 °C, danach Aufnahme in 6 n HCl (FIALA, 1973); Bestimmung des Curcumin-Farbkomplexes kolorimetrisch (FIALA, 1974).

S: Aufschluß in Schöninger-Kolben (DEDENON und CARLIER, 1975) nachfolgende Bestimmung durch Turbidimetrie gegen Bariumchlorid-Gelatine-Komplex im Photometer (Standard methods for the examination of water and wast water, 1965).

N: Gesamtgehalt nach Kjeldahl-Aufschluß, Destillation in Büchi-Gerät, titrimetrische Bestimmung gegen 0.02 normale NaOH.

C: Trockene Veraschung im Sauerstoffstrom in Wösthoff-Apparatur. Der Humusgehalt ergibt sich durch Multiplikation mit dem Faktor 1,72.

Die Mineralbodenproben wurden nach JACKSON (1960) mit HF + $HClO_4$ aufgeschlossen: 0,1 g gemörserte Feinerde werden mit 0,5 ml $HClO_4$ und 5 ml HF (bei humusreichen Proben 10fache Perchlorsäuremenge) in Platintiegeln auf dem Sandbad abgeraucht. Danach Aufnahme mit 10 ml 5 normaler HCl und Auffüllen auf 100 ml.

Die Analyse der einzelnen Elemente erfolgte wie oben beschrieben.

Zur Bestimmung der "leicht pflanzenverfügbaren Fraktionen" wurden die Mineralbodenproben mit 1 %er Zitronensäure extrahiert (100 ml 1 % $C_6H_8O_7$/100 g Boden) Methode nach ARRENIUS (KNICKMANN, 1955). Im Extrakt wurden P, K, Ca und Mg wie oben beschrieben bestimmt.

Die pH-Werte wurden potentiometrisch in Suspensionen mit H_2O und $CaCl_2$ (1:2,5) ermittelt.

6. ERGEBNISSE UND DISKUSSION: PINUS TAEDA L.

Es werden hauptsächlich folgende Beziehungen diskutiert: Abhängigkeit der Wuchsleistung vom Nährelementgehalt im obersten Mineralboden sowie vom Ernährungszustand, ermittelt durch Analysen der halbjährigen Nadeln; Beziehung zwischen den Elementgehalten der halbjährigen Nadeln, der L-Lage und F-Lage.

Da es sich durchweg um junge Erstaufforstungen handelt, spiegeln die Analysendaten des obersten Mineralbodens (0 - 20 cm) im wesentlichen Humuszustand und Nährstoffverhältnisse der Standorte vor der Aufforstung wider. Die L- und F-Lage ist andererseits vollständig unter den Pinus-Pflanzungen gebildet.

Es ist zu bemerken, daß die Ansprache von L- und F-Lage nach den in Brasilien üblichen Kriterien erfolgte. Diese decken sich mit den Definitionen von PRITCHETT (1979). Danach umfaßt die L-Lage die noch nicht veränderten Nadeln; die F-Lage die zerkleinerten Nadeln mit teilweisem Abbau, aber noch deutlich erkennbarer Herkunft. Feinhumus, d. h. makroskopisch strukturlose organische Substanz, ist nach dieser Definition in der F-Lage erst sehr wenig vorhanden. Nach der Definition von BABEL et al. (1980) wäre die F-Lage der Untersuchungsstandorte dieser Arbeit als L_2-Lage anzusprechen und die L-Lage als L_1-Lage.

Die Wuchsleistung von Pinus taeda auf den Standorten des hier untersuchten Bezirks 7 ist allgemein gut. Dies ergibt sich aus Vergleichen mit der Wuchsleistung in anderen Gebieten (GOLFARI, 1971; FUPEF, 1977).

Es handelt sich durchweg um 8-jährige Bestände mit Pflanzabständen von 2,5 x 2,5 m. Das Pflanzmaterial und die Einzelheiten der Bestandesbegründung sind im Untersuchungsgebiet sehr einheitlich. Auch die großklimatische Situation ist ziemlich homogen.

Bekanntlich hängt die Wuchsleistung von Baumbeständen (Produktivität, Ertrag) von einer Reihe von Faktoren ab (FIEDLER et al., 1973). Es lassen sich unterscheiden "direkte Faktoren" wie Licht, Wärme, Wasser und Nährelemente und "indirekte Faktoren" wie Höhenlage, Exposition, Ent-

wicklung des Bodenprofils usw. Aus der jeweiligen Konstellation resultiert die Wuchsleistung. Hauptziel der Untersuchungen ist die Analyse der Variation der Wuchsleistung in Abhängigkeit von der Nährelementversorgung.

Die Wuchsleistung wird ausgedrückt als Mittelhöhe der 100 stärksten Bäume pro ha (h_{100}). Diese Größe hat sich bei vergleichenden ökologischen Untersuchungen als Ausdruck der Wuchsleistung sehr bewährt. (HILDEBRAND et al., 1976; BLUM und HILDEBRAND, 1977).

Die Nährelementversorgung der Baumbestände wird vom Nährelementvorrat und seiner Verfügbarkeit maßgeblich bestimmt. Diese Faktoren werden durch Analysen der Gesamtgehalte von Nährelementen im Hauptwurzelraum der Bestände (0 - 20 cm) und der leicht löslichen Anteile charakterisiert. Die tatsächliche Aufnahme von Nährelementen durch die Bäume läßt sich durch diese Werte nur unvollkommen abschätzen. Es wurde daher der Ernährungszustand der Bäume durch Nadelanalysen (1. Nadeljahrgang = halbjährige Nadeln) ermittelt. Dieses Verfahren hat sich vielfach ausgezeichnet bewährt. Die statistische Auswertung der Daten und absolute Einschätzung der Analysenwerte anhand von bekannten Grenzwerten soll zeigen, ob bzw. welche Nährelemente im Untersuchungsgebiet wachstumsbegrenzend auftreten.

Die Analysenmethoden sind bereits in Kap. 5. 5. beschrieben. Genetisch bedingte Variationen (PRITCHETT und GODDARD, 1967; THAMES, 1963; WALKER und HATCHER, 1965; EPSTEIN, 1976) sind auch in den untersuchten Beständen nicht ganz auszuschließen, da die Herkunft des Saatguts nicht völlig kontrollierbar war.

Ein gewisses Problem stellt die Probenahme der Streu (L-Lage) dar. Im starken Astwerk der jungen Pinus taeda-Bäume bleiben nämlich viele der sehr langen Nadeln (15 - 20 cm) nach dem Abfallen in den unteren Astquirlen hängen. Es gibt bislang keine Untersuchungen über diese Streumenge bzw. die genaue Verweildauer der Streunadeln im Kronenraum. Auf jeden Fall ist diese Besonderheit bei der Diskussion der Nährelementauswaschung oder -anreicherung in der Streulage zu berücksichtigen.

6.1 Makronährelemente

6.1.1. Stickstoff

6.1.1.1. N-Gehalt der halbjährigen Nadeln und Wuchsleistung

Naturgemäß spielt Stickstoff bei der Ernährung der untersuchten Kiefern eine wichtige Rolle. Wie Abb. 3 zeigt, ergibt sich jedoch keine Beziehung zwischen dem Stickstoffernährungszustand und dem Wachstum der Bestände. Die N-Gehalte der halbjährigen Nadeln zeigen keine große Differenzierung (fast alle Werte zwischen 18 - 20 mg/g) und liegen alle im Bereich ausreichender oder sogar guter Versorgung. Erst bei Gehalten unter 12 mg/g wäre unzureichende Versorgung anzunehmen (ZÖTTL und TSCHINKEL, 1971).

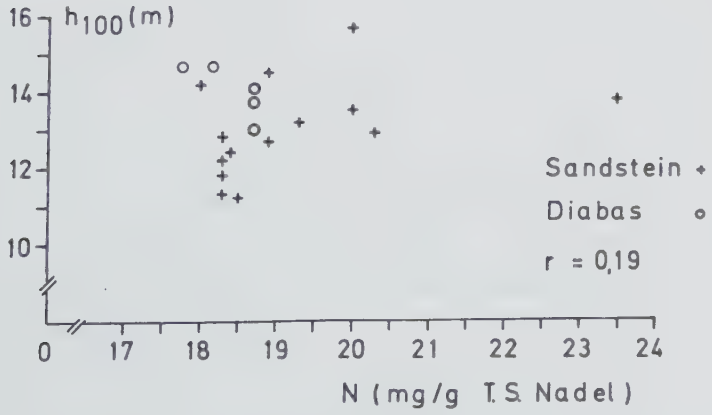

Abb. 3: Zusammenhang zwischen N-Gehalt in Nadeln und Baumhöhe

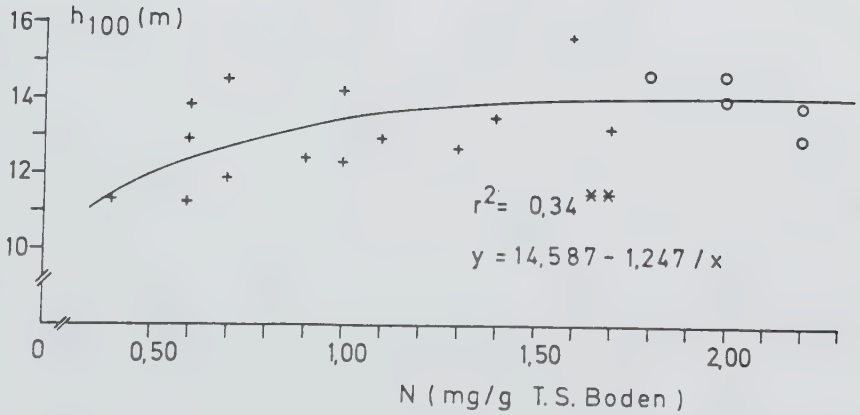

Abb. 4: Beziehung zwischen N-Gehalt im Boden und Baumhöhe

6.1.1.2. N-Gehalt im Mineralboden und Wuchsleistung

Der Gesamtgehalt des Bodens an Stickstoff ist zweifellos nur ein sehr grobes Maß für die Versorgung mit diesem Nährelement. Bessere Aussagen wären mit Hilfe von Inkubationsversuchen möglich, bei denen die mikrobielle N-Mineralisation geprüft wird (ZÖTTL, 1967). Dieses Verfahren war jedoch für die hier besprochenen Untersuchungen zu zeitaufwendig.

Die Untersuchungsstandorte unterscheiden sich in ihrem Stickstoffgehalt des Oberbodens vor allem in Abhängigkeit vom Muttergestein. Die hohen Stickstoffgehalte stammen durchweg von den Diabas-Standorten (Terra Rocha, Diabas-Ranker). Diese gesteinsbedingte Differenzierung der Stickstoffgehalte im obersten Mineralboden läßt sich auf zwei Faktoren zurückführen. Die Diabas-Standorte sind gegenüber der anderen Standortsgruppe auf Sandstein deutlich tonreicher. Damit ist in höherem Ausmaße eine Ton-Humus-Koppelung mit Konservierung stickstoffreicher Huminstoffe gegenüber dem raschen Abbau gegeben. Außerdem waren die Diabas-Standorte bis in die jüngste Vergangenheit überwiegend mit Araukarienwäldern bestockt, stellen somit alte Waldböden dar. Auf den Sandstein-Böden setzte die landwirtschaftliche Nutzung einschließlich wiederholter Brandrodung wesentlich früher ein. Vielfach tragen sie daher Campo-Vegetation. Ihre biologische Aktivität ist wesentlich geringer, die Anfälligkeit gegen Bodenabtrag deutlich höher. Diese Zusammenhänge gehen aus früheren Untersuchungen in anderen Gebieten Brasiliens hervor (van GOOR, 1965; de HOOG, 1973), in denen der starke Einfluß der früheren Landnutzung als wachstumsbestimmender Faktor von Aufforstungen hervorgehoben wurde. Auch WELLS und METZ (1963) zeigen ähnliche Beziehungen zwischen Bodentyp und Stickstoffgehalt.

Der niedrige Korrelationskoeffizient macht diese Beziehungen schwach deutlich. Erstaunlicherweise ergibt sich jedoch, wie oben gezeigt, keine entsprechende Differenzierung im nadelanalytisch ermittelten N-Versorgungsgrad der Bestände (s. Abb. 4).

6.1.1.3. N-Gehalt der halbjährigen Nadeln, L- und F-Lage

Für die einzelnen Standorte läßt sich keine Beziehung zwischen den N-Gehalten in der frischen Nadel und den Nadeln der Streu- bzw. F-Lage feststellen. Angesichts der geringen Variationsbreite der N-Gehalte in den halbjährigen Nadeln ist dies nicht überraschend.

Tabelle 4: Vergleich der Stickstoffgehalte von Nadeln sowie L- und F-Lage in Pinus taeda-Beständen (Mittelwerte aller Bestände)

	N mg/g T. S.	Signifikanz der Mittelwert-Differenzen +)
Nadeln (N)	19,1	N - L: t = 39,88^{++}
L-Lage (L)	6,3	N - F: t = 15,66^{++}
F-Lage (F)	10,1	F - L: t = 8,75^{++}

Im Durchschnitt hat die L-Lage wesentlich niedrigere N-Gehalte als die halbjährigen Nadeln (Tab. 4). Wenn auch die mehrjährigen Nadeln bis zum Zeitpunkt des Abfallens eine gewisse Abnahme der N-Gehalte zeigen dürften, läßt sich der große Sprung zum niedrigen N-Gehalt der Streulage wohl nur durch Rückzug von Stickstoffverbindungen vor dem Abfall der Nadeln erklären (vgl. ZÖTTL, 1974). Vielleicht spielt auch eine gewisse Auswaschung während des Hängens der Nadeln an den Ästen eine Rolle. Die F-Lage zeigt wiederum höhere N-Gehalte, was auf die relative Anreicherung von Stickstoff beim mikrobiellen Abbau des organischen Materials zurückzuführen ist (stärkere Veratmung der C-Verbindungen). Die C/N-Quotienten liegen im Vergleich mit anderen Kiefernstandorten sehr hoch (s. Tab. 5).

+) Prüfung auf Signifikanz durch t-Test für "Paired observations" (vgl. STEEL und TORRIE, 1960; FREESE, 1967).
Tabellierter t-Wert für t 0,05; 18 F.G. = 2,10 (+) - t 0,01; 18 F.G. = 2,88 (++) (n.S. = nicht signifikant. Die gleiche Prozedur und Symbolik wird in den anderen t-Tests angewendet.

Tabelle 5: C/N- und C/P-Verhältnisse (Mittelwerte) der Pinus taeda-Standorte

	C/N	C/P
L-Lage (L)	81	1159
F-Lage (F)	48	875

6.1.2. Phosphor

Der Phosphorversorgung in Untersuchungen von Kiefernaufforstungen wurde stets große Bedeutung als Wachstumsfaktor beigemessen. Eine Reihe eingehender Untersuchungen (BAUR, 1959; FOWELLS und KRAUS, 1959; PRITCHETT und SWINFORD, 1961; SCHOPMEYER, 1966; PRITCHETT, 1968; HUMPHREYS und PRITCHETT, 1972; BALLARD und PRITCHETT, 1975 a, b; McCARTHY und DAVEY, 1976) ergaben, daß häufig eine unzureichende P-Versorgung das Wachstum von Pinus taeda begrenzt, obwohl sie eine wenig anspruchsvolle Baumart ist. Dies zeigt sich vor allem bei Untersuchungen in großräumigen Aufforstungen. Positive Düngungseffekte bestätigen in vielen Fällen die P-Mangelsituation. Sie beruht in den meisten Fällen auf einem sehr geringen P-Vorrat der Böden, was in der Regel gesteinsbedingt ist. Verschärfend kommt in weiten Gebieten eine starke Festlegung der Phosphate hinzu.

Erstaunlicherweise zeigen die nachfolgend geschilderten Ergebnisse für die untersuchten südbrasilianischen Standorte ein abweichendes Bild.

6.1.2.1. P-Gehalt der halbjährigen Nadeln und Wuchsleistung

Die nadelanalytischen Daten zeigen nur eine schwache Beziehung zur Wuchsleistung. Tatsächlich liegt also nur eine geringe Variation vor, die auch kaum eine Differenzierung zwischen den Diabas- und Sandstein-Standorten

erkennen läßt. Die Werte liegen durchweg im Bereich zufriedenstellender oder suboptimaler Versorgung. In anderen Gebieten werden sogar noch etwas niedrigere Werte von 1,1 - 1,25 mg/g P als ausreichend angesehen (METZ et al., 1966; SWITZER und NELSON, 1972). FOWELLS und KRAUS (1959) und McGEE (1963) zeigen andererseits, daß Phosphormangel erst bei weniger als 0,9 mg/g zu erwarten ist, im übrigen aber nach Kulturversuchen eine optimales Wachstum Werte von 1,3 - 1,8 mg/g erfordert. Zu diesen Optimalwerten ist jedoch anzumerken, daß in Kulturversuchen mit wenigjährigen Pflanzen regelmäßig höhere Optimalwerte erhalten werden, als für Pflanzungsbestände gelten.

Die Ergebnisse demonstrieren die Genügsamkeit von Pinus taeda im Hinblick auf den Phosphorbedarf, denn insgesamt gilt der Untersuchungsraum vorliegender Arbeit in der landwirtschaftlichen Bodennutzung durchaus als schlecht mit Phosphor versorgt (CENTRO DE PESQUISAS PEDOLÓGICAS, 1975). Interessant ist der stark nach oben abweichende Standort (s. Abb. 5). Es handelt sich um einen Sandstein-Latosol mit sehr hohem Humusgehalt (4,9 mg/g). Es ist ein Hangfuß-Standort mit deutlicher Akkumulation von Bodenmaterial.

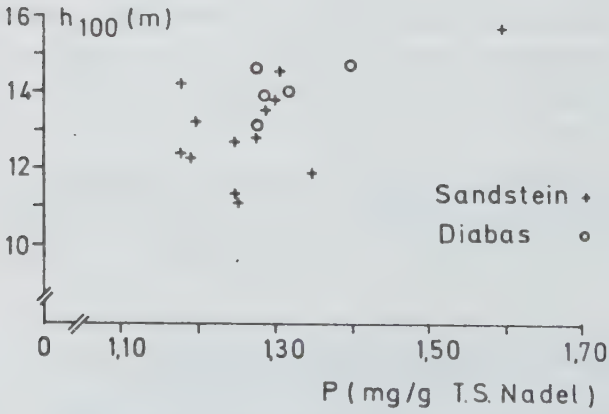

Abb. 5: Zusammenhang zwischen P-Gehalt in P. taeda-Nadeln und Baumhöhe

6.1.2.2. P-Gehalt im Mineralboden und Wuchsleistung

Die P-Gehalte der untersuchten Standorte staffeln sich deutlich in Abhängigkeit vom Ausgangsgestein. Die Sandstein-Standorte liegen zwischen 170 - 240 ug/g (lediglich der schon erwähnte Standort fällt mit 1056 ug/g aus dem Rahmen). Im Diabas-Gebiet liegen die Gehalte zwischen 760 - 800 ug/g. Infolge der verschiedenen Lage der Punktescharen der Sandstein-Standorte und der Diabas-Standorte sowie des herausfallenden Extremstandortes errechnet sich keine signifikante Korrelation zwischen dem P-Gehalt im Boden und der Wuchsleistung. Berücksichtigt man zusätzlich die oben geschilderten Verhältnisse beim P-Versorgungsgrad der Nadeln, so läßt sich insgesamt feststellen, daß Phosphor offenbar auf den untersuchten Standorten keinen wachstumsbegrenzenden Faktor darstellt (s. Abb. 6).

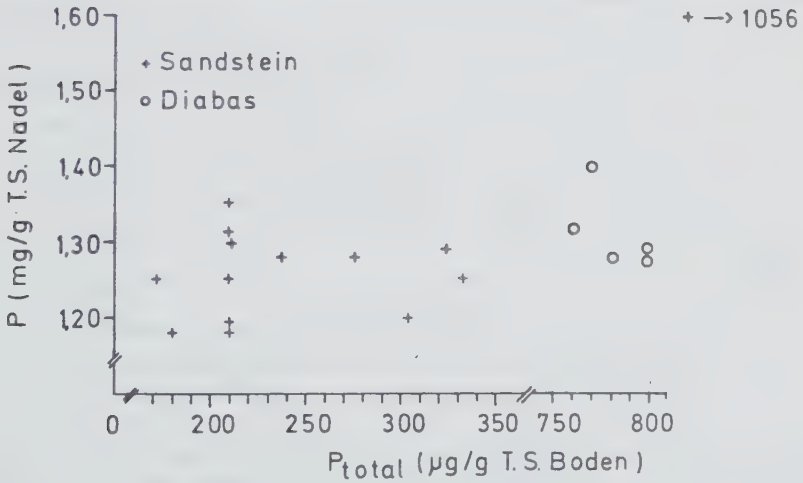

Abb. 6: Zusammenhang zwischen P (total)-Gehalt im oberen Mineralboden und Baumhöhe von P. taeda

Auch die Werte der zitronensäurelöslichen P-Gehalte ergeben kein anderes Bild. Es lassen sich keine Beziehungen herstellen. Insgesamt liegen die zitronensäurelöslichen Anteile jedoch sehr niedrig. Aus Untersuchungen von BAUR (1959) zeigt sich, daß Pinus taeda noch bei 70 ug/g P (total) gutes Wachstum erzielt. Dies bestätigt die obige Aussage.

Bezüglich der Aussagekraft der P-Analysen sei auf BALLARD und PRITCHETT (1975a) hingewiesen, die den Gesamtgehalten größere Aussagekraft zuerkennen. Im Untersuchungsgebiet dieser Autoren war die P-Versorgung der Aufforstungen allerdings meist mangelhaft bis wenig ausreichend, was aus den nadelanalytischen Daten von 0,4 - 1,1 mg/g hervorgeht.

6.1.2.3. P-Gehalt der halbjährigen Nadeln, L- und F-Lage

In gleicher Weise wie bei Stickstoff läßt sich auch für Phosphor keine Beziehung zwischen diesen Größen auf den einzelnen Standorten feststellen. Dies überrascht angesichts der relativ geringen Variation der P-Gehalte in den halbjährigen Nadeln nicht. Aus Tab. 10 gehen die charakteristischen Unterschiede der P-Gehalte in den einzelnen Lagen hervor. Offensichtlich wird auch Phosphor vor dem Abfallen der Nadeln in den Baum zu einem beträchtlichen Anteil zurückgezogen und reichert sich dann beim mikrobiellen Abbau in der F-Lage relativ stärker an. Die C/P-Quotienten sind außerordentlich weit (s. Tab. 5). Derartig hohe Werte findet man sonst nur in phosphorarmen Rohhumusstandorten. Die hier ermittelten Werte entsprechen denen von JÖRGENSON und WELLS (1973): F-Lage 0,65 - 0,72 mg/g.

Beim Vergleich der P-Gehalte in L- und F-Lage fällt der relativ geringe Unterschied auf. Er zeigt, daß die relative Anreicherung von P deutlich geringer ist als die von Stickstoff (s. Tab. 4 und 6).

Tabelle 6: Vergleich der Phosphorgehalte von Nadeln sowie L- und F-Lage in P. taeda Beständen (Mittelwerte aller Bestände)

	Mittelwert (mg/g T.S.)	Signifikanz der Mittelwertdifferenzen
Nadeln (N)	1,29	N - L: t = 16,34^{++}
L-Lage (L)	0,44	N - F: t " 22,81^{++}
F-Lage (F)	0,56	F - L: t " 2,73^{+}

6.1.3. Kalium

6.1.3.1. K-Gehalt der halbjährigen Nadeln und Wuchsleistung

Die Kaliumversorgung der untersuchten Bestände steht nach den Nadelanalysen in klarer Beziehung zum Wachstum (Abb. 7). Die Diabas-Standorte haben durchweg höhere K-Gehalte in den Nadeln, auch ein Teil der Sandstein-Standorte erreicht jedoch dieses Niveau. Die Ausgleichskurve taucht im Bereich der schlechtwüchsigen Standorte in den Mangelbereich. Er wird von HEIBERG und WHITE (1951), WALKER (1955) bei 3,4 mg/g angenommen, von SUCOFF (1961) noch tiefer mit 2,6 mg/g. Es darf als gesichert gelten, daß Werte zwischen 3 und 4 mg/g eine mangelhafte Kaliumversorgung charakterisieren. Auf einigen der Untersuchungsstandorten ist nach diesen Daten das Wachstum durch Kaliummangel begrenzt. Dies ist in Übereinstimmung mit dem Auftreten von Mangelsymptomen. Es wurden nämlich braune Verfärbungen an der Nadelspitze auf einigen Standorten beobachtet.

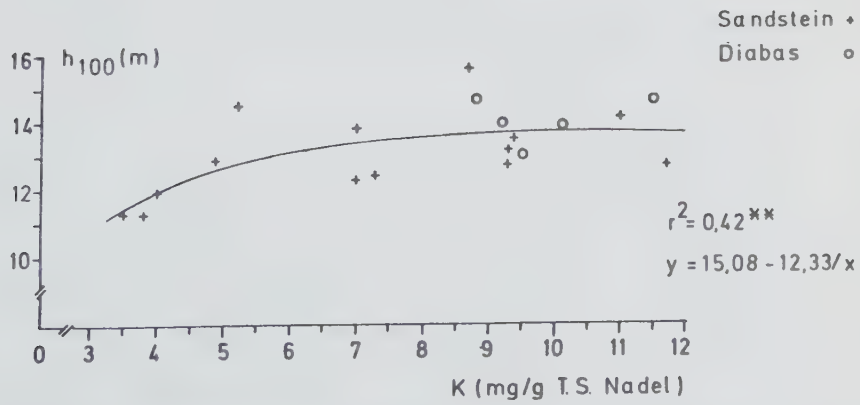

Abb. 7: Beziehung zwischen K-Gehalt in P. taeda-Nadeln und Baumhöhe

Der Verlauf der Ausgleichskurve ist durchweg typisch. In Übereinstimmung mit anderen Autoren, z. B. WELLS (1965) läßt sich für Werte ab 6 - 7 mg/g eine optimale Versorgung mit Kalium annehmen. Die Diabas-Standorte sind offenbar ausgezeichnet mit Kalium versorgt.

6.1.3.2. K-Gehalt im Mineralboden und Wuchsleistung

Die Gesamtgehalte an Kalium im Hauptwurzelhorizont zeigen keine Beziehung zur Wuchsleistung oder zum nadelanalytisch ermittelten Kaliumversorgungsgrad der Bestände. Tabelle 7 gibt die Gesamtgehalte zwischen etwa 400 - 1000 ug/g Gesamtkalium an. Die Bindungsformen des Kaliums in den untersuchten Böden sind offenbar sehr verschieden, weshalb die Gesamtgehalte offenbar nur wenig über die Verfügbarkeit aussagen. Weit besser ist dies bei den zitronensäurelöslichen K-Anteilen (s. Abb. 8). Sie betragen bei den Sandstein-Standorten nur etwa 1 - 2,5 % des Gesamtkaliums, liegen aber bei den Diabas-Standorten mit 5 - 25 % ungleich höher. Dementsprechend ergeben sich für die Beziehung von zitronensäurelöslichem Kalium im Boden zur Wuchsleistung oder zum Kaliumgehalt der halbjährigen Nadeln jeweils charakteristische signifikante Korrelationen

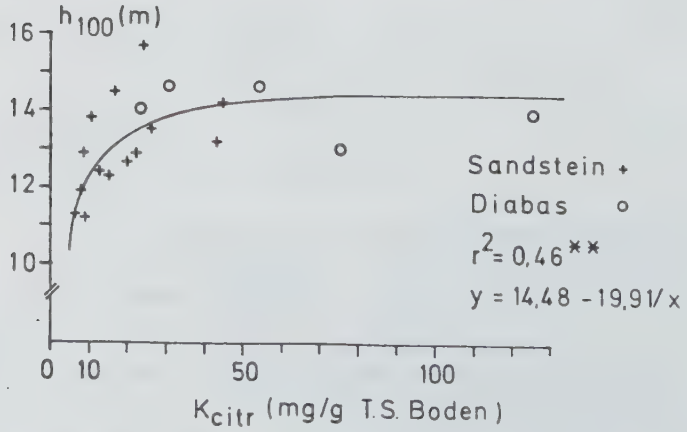

Abb. 8: Beziehung zwischen zitronensäurelöslichem K im oberen Mineralboden und Baumhöhe von P. taeda.

(s. Abb. 9). Die Kaliummangel-Bestände haben weniger als 10 ug/g zitronensäurelösliches Kalium im Oberboden.

Tabelle 7: Kalium-Gehalte (total und zitronensäurelöslich) bei unterschiedlichem Gestein und Böden

Ausgangsgestein		Diabas		Sandstein	
Bodentyp		"Terra Rocha Estruturada"	Ranker	"Podzolico Vermelho Amarelo"	Latosol
K total	(ug/g T. S.)	420	630	1000	600
K citr		70	31	10	26

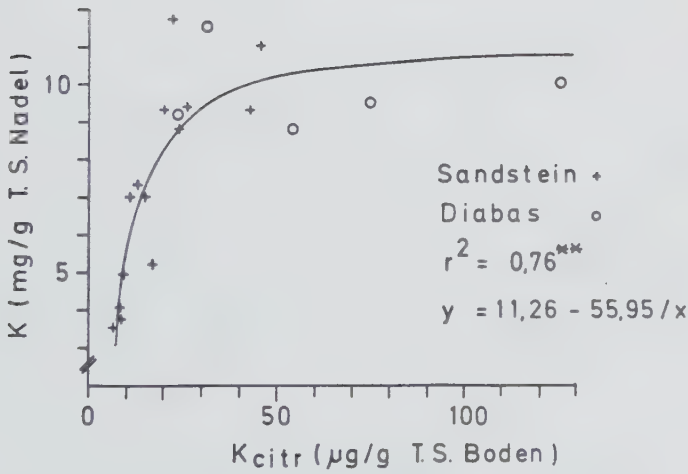

Abb. 9: Beziehung zwischen zitronensäurelöslichem K in oberem Mineralboden und K-Gehalt in P. taeda-Nadeln

Die Bestimmung des zitronensäurelöslichen Kaliums ist somit von großer Aussagekraft für die Beurteilung der Kaliumversorgung von südbrasilianischen Pinus taeda-Aufforstungen.

6.1.3.3. K-Gehalt in halbjährigen Nadeln, L- und F-Lage

Im Gegensatz zu Stickstoff und Phosphor läßt sich für Kalium eine deutliche Beziehung zwischen den Gehalten der halbjährigen Nadeln und den jeweiligen L- und F-Lagen feststellen (Abb. 10 und 11). Die Nadeln mit dem höheren Kaliumgehalt liefern eine wesentlich kaliumreichere Streu- und F-Lage. Die extrem mangelhaft mit Kalium versorgten Nadeln produzieren auch in der Streu- und F-Lage sehr niedrige Werte.

Die hohe Beweglichkeit von Kalium und seine hohe Anfälligkeit gegenüber Auswaschung spiegelt sich im extremen Abfall der Werte für L- und F-Lage gegenüber den frischen Nadeln wider. L- und F-Lage haben Mittelwerte bei 0,7 mg/g, was weniger als 1/10 der Mittelwerte in den halbjährigen Nadeln bedeutet. Vermutlich spielt hier auch die Auswaschung durch Regen bei den in den Astquirlen hängenden Streunadeln eine große Rolle. Die Kaliumauswaschung ist offensichtlich beim Übergang der Nadel in die Streulage schon sehr weit fortgeschritten. Sie setzt sich jedoch auch in der F-Lage noch fort. Wäre hier die Auswaschung gestoppt, so müßten die Werte über denen der L-Lage liegen, da ja ein deutlicher Abbau der C-Verbindungen abläuft. Kalium zeigt somit nicht wie Phosphor oder Stickstoff eine relative Anreicherung in der F-Lage.

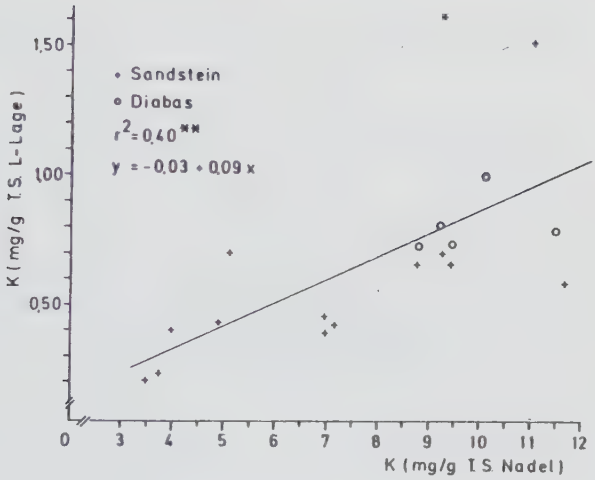

Abb. 10: Beziehungen zwischen K-Gehalt in P. taeda-Nadeln und L-Lage

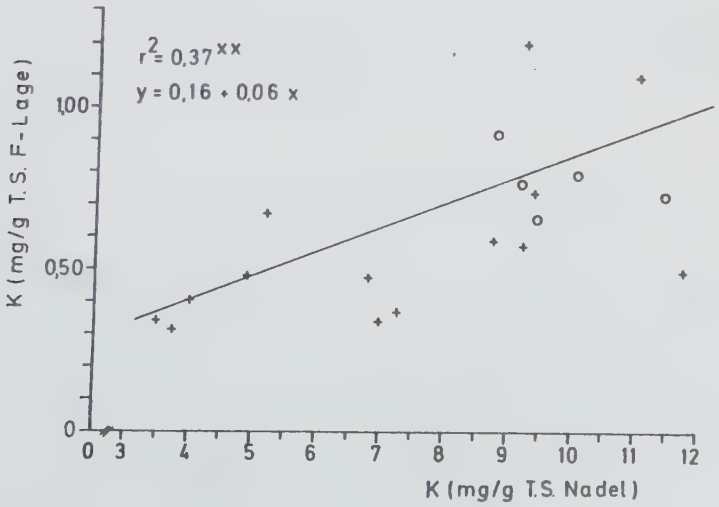

Abb. 11: Beziehungen zwischen den K-Gehalt in P. taeda-Nadeln und F-Lage

6.1.4. Calcium

6.1.4.1. Ca-Gehalt der halbjährigen Nadeln und Wuchsleistung

Der Calciumspiegel der halbjährigen Nadeln ist - siehe Abb. 12 - signifikant mit dem Höhenwachstum der Untersuchungsbestände korreliert. Allerdings ist die Streuung besonders im Bereich niedriger Werte sehr hoch: mit ca. 0,6 mg/g Ca werden Wuchsleistungen von 11 - 14,5 m erreicht. Es scheint daher sehr fraglich, daß die geringen Calciumwerte einiger Untersuchungsbestände tatsächlich wachstumsbegrenzend sind. Aus der Literatur gibt es keine sicheren Anhaltspunkte für den Calciummangelbereich von Pinus taeda. LUTZ und CHANDLER (1947) stellen diese Kiefernart unter den nordamerikanischen Baumarten in die Gruppe mit dem geringsten Anspruch an die Calciumversorgung. Auch angesichts der Pionierbaumeigenschaften von Pinus taeda und ihres Vordringens auf wenig fruchtbare Standorte in den USA kann man mit geringen Calciumansprüchen rechnen. Die Schwankungsbreite der hier gefundenen Calciumwerte entspricht der von SWITZER und NELSON (1972) in natürlichem Verbreitungsgebiet gefundenen Spreitung. Andererseits fanden LEAR und GOEBEL (1976) auch höhere Gehalte von 2.7 mg/g.

6.1.4.2. Ca-Gehalt im Mineralboden und Wuchsleistung

Die untersuchten Standortgruppen haben sehr verschiedene Calciumgesamtgehalte im Oberboden (Tab. 8). Die Differenzierung zwischen Ca-reichen Diabas-Böden und Ca-armen Sandstein-Böden wird noch deutlicher bei den Werten für zitronensäurelösliches Calcium. Aus Abb. 13 ist der hoch signifikante Zusammenhang zwischen zitronensäurelöslichem Calcium im Mineralboden und dem Calciumgehalt der halbjährigen Nadeln ersichtlich. Diese straffe Korrelation wird nicht nur durch die weit in den Bereich hoher Ca-Werte ausgreifenden Diabas-Standorte bewirkt, sondern besteht auch innerhalb der Sandstein-Standorte. Die Bestände auf Böden mit höhe-

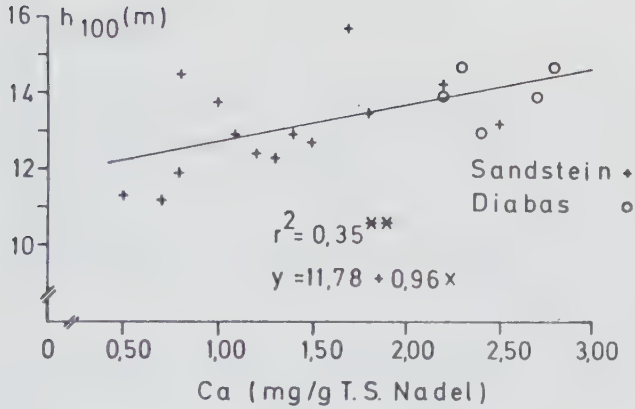

Abb. 12: Beziehungen zwischen Ca-Gehalten in P. taeda-Nadeln und Baumhöhen

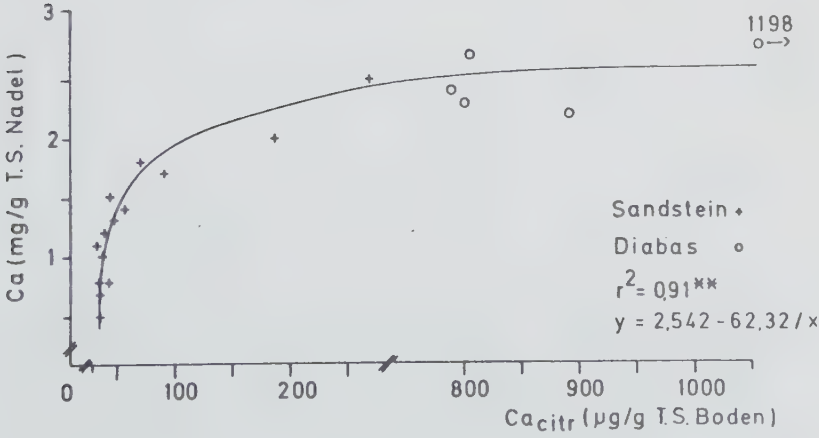

Abb. 13: Beziehung zwischen zitronensäurelöslichem-Ca in oberem Mineralboden und den Ca-Gehalten in P. taeda-Nadeln

rem Anteil leichtlöslichen (und damit pflanzenaufnehmbarem) Calcium nehmen offensichtlich entsprechend mehr Calcium auf. Im Vergleich zu Grenzwerten unzureichender Calciumversorgung von MOLL (1977) liegen auch die hier gezeigten niedrigsten Werte noch über dem Mangelbereich. Zweifellos werden allgemein die besseren Untersuchungsstandorte auch durch höhere Gehalte an leicht löslichem Calcium charakterisiert.
Ca (citr.) ist daher ein gutes Maß für die allgemeine Bodenfruchtbarkeit. Die Calciumversorgung der untersuchten Bestände begrenzt jedoch offenbar in keinem Fall das Wachstum.

Tabelle 8: Calzium-Gehalte (total und zitronensäurelösliches) bei unterschiedlichem Gestein und Böden

Ausgangsgestein	Diabas		Sandstein	
Bodentyp	"Terra Rocha Estruturada"	Ranker	"Podzólico Vermelho Amarelo"	Latosol
Ca total (mg/g T.S.)	2,60	3,85	0,93	0,71
Ca citr (ug/g T.S.)	853	1196	40	101

6.1.4.3. Ca-Gehalt der halbjährigen Nadeln, L- und F-Lage

Ähnlich wie bei Kalium besteht auch für Calcium eine enge Beziehung zwischen dem Ca-Gehalt der lebenden Nadel und der daraus hervorgegangenen L- und F-Lage der einzelnen Standorte (s. Abb. 14 und 15). Calcium reichert sich bekanntlich mit dem Lebensalter pflanzlicher Organe zunehmend an. Diese Akkumulation setzt sich in die L-Lage hinein fort; sie hat im Mittel 4,5 mg/g Ca gegenüber einem Mittelwert der halbjährigen Nadeln von 1,6 mg/g. Die Ca-Gehalte der F-Lage unterscheiden sich nur wenig von denen der L-Lage. Die Korrelation zwischen Ca-Gehalt in der halbjährigen Nadel und der F-Lage ist sogar noch enger als zwischen Nadelgehalt

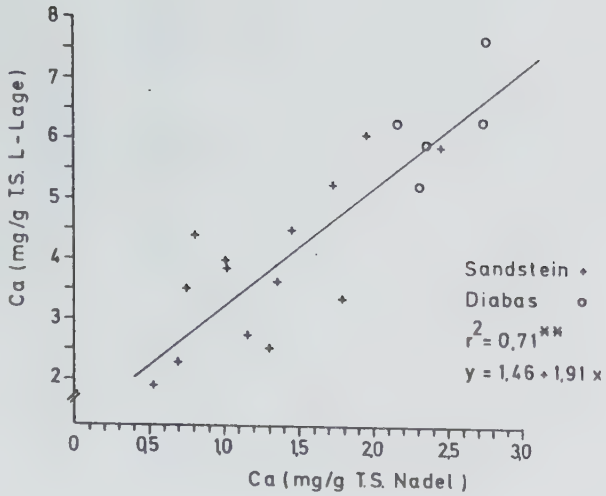

Abb. 14: Beziehung zwischen den Ca-Gehalt in P. taeda-Nadeln und L-Lage

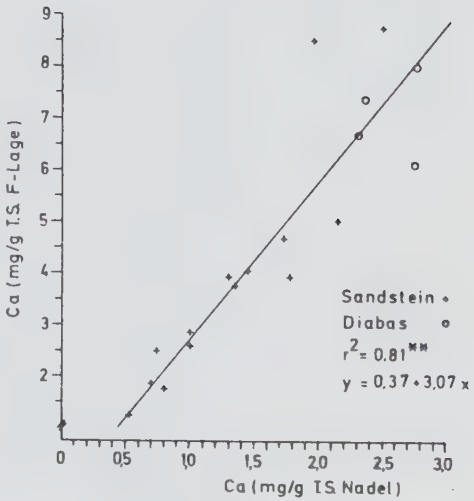

Abb. 15: Beziehung zwischen den Ca-Gehalt in P. taeda-Nadeln und F-Lage

und L-Lage. Besonders die F-Lage spiegelt somit die Calciumversorgung der Bestände ausgezeichnet wider.

6.1.5. Magnesium

6.1.5.1 Mg-Gehalt der halbjährigen Nadeln und Wuchsleistung

Zwischen dem Magnesiumversorgungsgrad und der Wuchsleistung der untersuchten Bestände zeigt sich eine enge Beziehung. Die Spreitung der Sandstein-Standorte reicht in die hohen Magnesiumwerte der Diabasgruppe hinein, so daß eine gleichmäßige Verteilung entsteht. Die Mg-Werte der schlechtwüchsigsten Bestände liegen im Mangelbereich, der nach LEAF (1968) bei 0,8 mg/g beginnt. Es handelt sich um die gleichen Standorte, die durch extrem niedrige Kaliumwerte auffallen (s. Abb. 16).

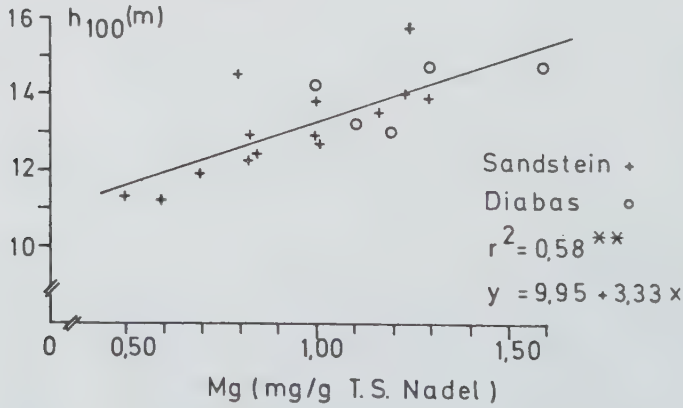

Abb. 16: Beziehung zwischen Mg-Gehalt in P. taeda-Nadeln und Baumhöhe

Andererseits ist darauf hinzuweisen, daß Bestände mit 0,8 mg/g Mg sehr starke Differenzierung in der Wuchsleistung besitzen. Es scheint daher

fraglich, ob für die südbrasilianischen Pinus taeda-Bestände bei 0.8 mg/g Mg bereits der Mangelbereich beginnt. Dies gilt vor allem auch deshalb, weil die Bestände mit den sehr niedrigen Magnesiumwerten ebenfalls sehr niedrige Kaliumwerte (Kap. 6.1.3.) und auch Verdacht auf Zinkmangel (Kap. 6.2.3.) aufweisen. Erst diagnostische Düngungsversuche könnten hier Klarheit schaffen.

6.1.5.2. Mg-Gehalt im Mineralboden und Wuchsleistung

Zwischen dem Gesamtgehalt an Magnesium im Oberboden und der Wuchsleistung ist keine Korrelation festzustellen. Zitronensäurelösliches Magnesium steht in gewisser Beziehung zur Wuchsleistung, wobei aber eine sehr starke Trennung in die beiden schon mehrfach beobachteten gesteinsbedingten Standortsgruppen eine große Rolle spielt (Abb. 17) Allerdings läßt sich auch für die Sandstein-Gruppe allein eine signifikante Beziehung errechnen. Ähnlich wie bei Calcium zeigt Abb. 18, daß auf Diabas etwa das Zehnfache des Mg-Gehaltes der Sandsteinböden angeboten wird.

Besser sind die Beziehungen zwischen den Mg-Gehalten im Boden und in den Nadeln (Abb. 18). Ähnlich wie bei Calcium zeigt auch hier der zitronenlösliche Gehalt die stärkste Differenzierung. Es handelt sich aber eigentlich nicht um eine Korrelation eines gleichmäßig verteilten Kollektivs, sondern um eine charakteristische Gruppierung entsprechend dem Standortstyp. Die Podzólico Vermelho Amarelo - Gruppe auf Sandstein hat jedenfalls die geringsten Werte. Sie liegen im Vergleich zu den Daten von MOLL (1977) bereits am Rand des Mangelbereichs. Aus Tab. 13 ist der Zusammenhang von Gesamtgehalten und löslichem Anteil für die einzelnen Standortsgruppen klar ersichtlich. Es läßt sich sagen, daß für Magnesium die zitronensäurelösliche Fraktion ebenso wie bei Calcium eine sehr brauchbare Größe darstellt, um die mutmaßliche Versorgung von Pinus taeda-Beständen zu beurteilen.

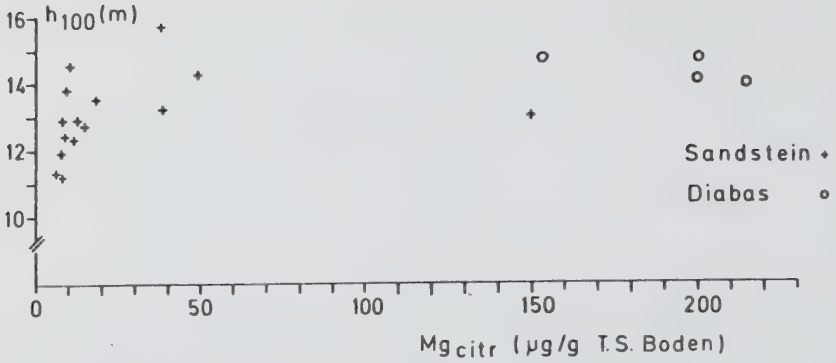

Abb. 17: Zusammenhang zwischen zitronensäurelöslichem Mg im oberen Mineralboden und Baumhöhe von P. taeda

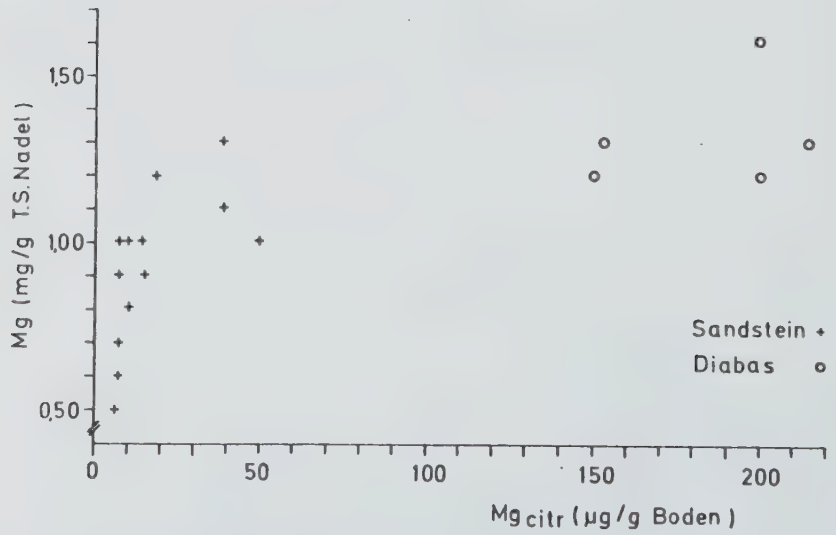

Abb. 18: Zusammenhang zwischen zitronensäurelöslichem Mg im oberen Mineralboden und Mg-Gehalt in den P. taeda-Nadeln

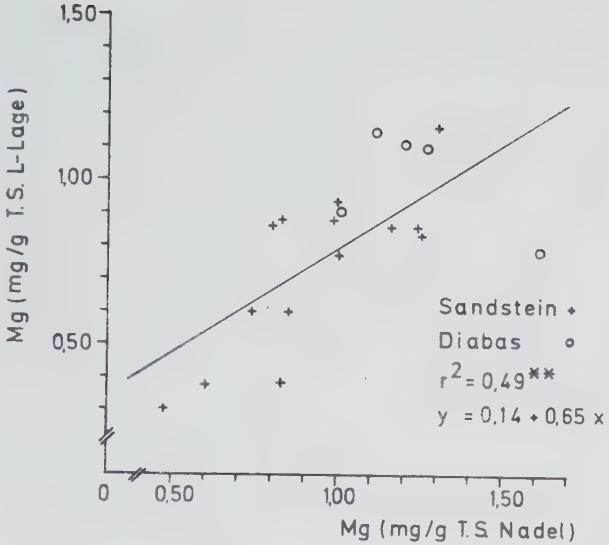

Abb. 19: Beziehung zwischen Mg-Gehalt in P. taeda-Nadeln und L-Lage

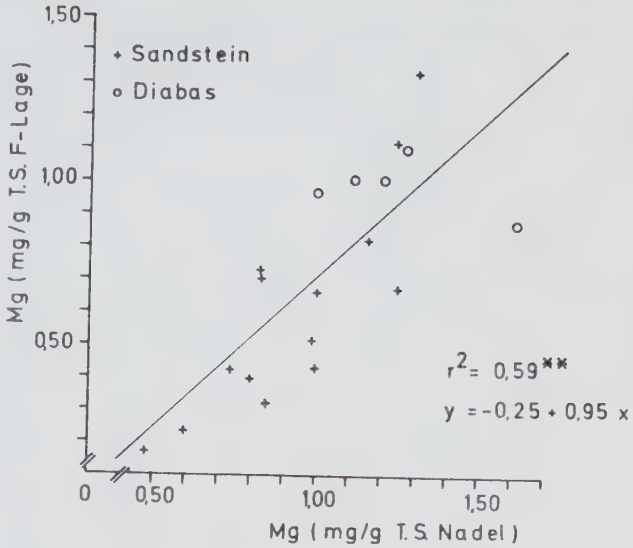

Abb. 20: Beziehung zwischen Mg-Gehalt in P. taeda-Nadeln und F-Lage

6.1.5.3. Mg-Gehalt der halbjährigen Nadeln, L- und F-Lage

Die Mg-Gehalte der halbjährigen Nadeln sind signifikant höher als die der L-Lage. Diese wiederum unterscheidet sich im Mg-Gehalt nur wenig von der F-Lage. An der beobachteten Differenz sind vermutlich weniger Rückzugsprozesse sondern eher Auswaschung verantwortlich. Für die einzelnen Standorte besteht eine - wenn auch schwache - Beziehung der Gehalte in den Nadeln der verschiedenen Lagen. Diese Beziehung geht auch aus Abb. 19 und 20 hervor. Die unterschiedliche Mg-Ernährung spiegelt sich somit auch in der L- und F-Lage noch in gewissem Umfange wider. Die Verluste an Magnesium beim Übergang von der frischen Nadel in die Streulage sind viel geringer als bei Kalium (s. Tab. 9).

Tabelle 9: Vergleich der Mg-Mittelwerte von Nadeln sowie L- und F-Lage in P. taeda-Beständen (Mittelwerte aller Bestände)

	Mittelwert (mg/g T.S.)	Signifikanz der Mittelwertdifferenzen
Nadeln (N)	1,02	N - L: t = 4,30^{++}
L-Lage (L)	0,81	N - F: t = 6,00^{++}
F-Lage (F)	0,72	L - F: t = 1,92 n.s.

6.1.6. Schwefel

Die Versorgung von Wäldern oder Aufforstungen mit dem Nährelement Schwefel ist sehr selten mangelhaft (LEAF, 1968, FIEDLER et al., 1973). Der S-Gehalt in den Assimilationsorganen von Baumarten liegt meist zwischen 1 - 3 mg/g Trockensubstanz. Mangelerscheinungen könnten bei Werten unter 1 mg/g auftreten (LEAF, 1968/1973). Spezielle Untersuchungen über die Schwefelversorgung von Kiefernaufforstungen liegen kaum vor. Für Pinus elliottii wurden S-Gehalte von 0,8 bis 1,0 mg/g bei nor-

malem Wachstum festgestellt (PRITCHETT, 1979). Für Pinus taeda gibt es lediglich Angaben aus Aufforstungen in Tanganyika auf jungen Böden vulkanischer Herkunft. Vierjährige Bestände mit Höhen um 6 m haben nach WAIL et al. (1961) S-Gehalte von 1,6 mg/g Trockensubstanz.

Es war anzunehmen, daß die hier untersuchten Bestände in Südbrasilien allgemein ausreichend mit Schwefel versorgt sind. Dies bestätigen die weiter unten genannten Zahlen. Andererseits bestand die Möglichkeit einer negativen Beeinflussung der Wuchsleistung durch erhöhte Schwefelimmissionen in der weiteren Umgebung der Papierfabrik der Fa. Klabin (6 Standorte im Bezirk Nr. 7).

Schwefelanalysen der Nadeln wurden daher von 6 Standorten in der Nähe der möglichen Immissionsquelle durchgeführt; zum Vergleich wurden weitere 6 Standorte - ebenso auf Sandsteinböden - in gesicherter großer Entfernung von der Immissionsquelle analysiert. Tabelle 10 zeigt die S-Gehalte beider Standortsgruppen. Sie unterscheiden sich mit Mittelwerten von 0,97 und 1,04 mg/g Trockensubstanz nicht voneinander (das möglicherweise kontaminierte Gebiet hat sogar die etwas geringeren Werte). Eine Wachstumsbeeinflussung durch Schwefelimmission ist damit unwahrscheinlich. Die Schwefelwerte liegen - wie oben bereits angedeutet - im Bereich für normales Wachstum.

Tabelle 10: S-Gehalte der halbjährigen P. taeda-Nadeln im Bezirk 7

Bezirk 7	S (mg/g T.S.)						$\bar{x}$
Mandaçaia	0,87	0,97	0,88	1,18	0,98	0,92	0,97
Mirandinha	1,02	0,99	0,98	1,14	1,10	0,98	1,04

6.1.7. Zusammenfassende Diskussion der Makronährelemente

Die Untersuchungen auf den 19 Standorten ergaben für die einzelnen Nährelemente und die Beziehungen zwischen Nährelementversorgung und Wuchsleistung folgende Ergebnisse.

Die Elemente N und P werden auf allen Standorten ausreichend angeboten; es zeigen sich keine Korrelationen zur Wuchsleistung. Die teilweise unzureichend vorhandenen Elemente K, Ca und Mg lassen positive Korrelationen mit der Wuchsleistung erkennen; auf 3 Standorten liegt mangelhafte Versorgung vor.

Die N-Versorgung ist auf allen Standorten ausreichend. Der niedrigste Gehalt in den Nadeln liegt bei 17,8 mg/g, also beträchtlich über der Grenze des Mangelbereichs (12 mg/g nach FOWELLS und KRAUS, 1959). Die Humusgehalte im obersten Mineralboden sind auf einigen Standorten, besonders auf "Podzólico Vermelho Amarelo" ausgesprochen niedrig. Das C/N-Verhältnis ist aber dennoch relativ eng. Die Werte variieren zwischen 11 - 18 (Mittelwert 14,7) Ein einziger Standort fällt aus dem Rahmen. Hier ist das C/N-Verhältnis mit 32 zwar hoch, trotzdem aber ein N-Gehalt von 18 mg/g in den halbjährigen Nadeln vorhanden.

Das im allgemeinen enge C/N-Verhältnis spricht für eine gute Mineralisationsrate (NEBE, 1966; ZÖTTL und TSCHINKEL, 1971; FASSBENDER, 1975). Deshalb ist trotz niedriger Humusgehalte (1,7 - 2,1 g/100 g) die N-Versorgung durchaus ausreichend.

Die P-Gehalte in den Nadeln liegen niedriger als die bisher für andere Kiefernarten bekannten Werte. Offensichtlich ist Pinus taeda aber auch bei geringer P-Versorgung noch gut wüchsig. Ähnliche Aussagen machen FOWELLS und KRAUSS (1959), die außerdem einen geringen N-Bedarf wahrscheinlich machen.

Auch die Nadelspiegelwerte von Pinus taeda in Südbrasilien liegen im Vergleich zu den Werten im Gebiet des natürlichen Vorkommens dieser Baumart überwiegend tiefer bei guter Wuchsleistung.

Beim Vergleich der einzelnen Standortsgruppen (s. Tab. 11) zeigt sich, daß die Gehalte an P, Ca, K und Mg in den halbjährigen Nadeln in enger Beziehung zum Ausgangsgestein stehen. Die Diabas-Böden zeigen immer höhere Gehalte und bessere Wuchsleistung, ebenso ein mehrfach erwähnter einzelner Sandsteinstandort, auf dem vermutlich andere Faktoren für die außergewöhnlich gute Wuchsleistung verantwortlich sind.

Die ungünstigste Nährstoffversorgung findet sich auf "Podzólico Vermelho Amarelo, wo die Kalium- und Magnesiumversorgung zweifellos mangelhaft ist. Dies läßt sich sowohl aus den Nadelanalysen als auch den geringen Werten für citronensäurelösliches Kalium und Magnesium sowie Calcium entnehmen (s. Tab. 12). Es ist anzunehmen, daß diese sehr schlecht mit K und Mg versorgten Böden in Mirandinhia unter intensiver landwirtschaftlicher Nutzung sowie Erosion gelitten haben. Dadurch wurden die Reserven und Anlieferung der genannten Elemente stark reduziert. Aufgrund ihrer sandkörnigen A- und tonreichen B-Horizonte sind diese Böden viel stärker der Erosion ausgesetzt (DIVISÃO DE PESQUISA PEDOLÓGICA, 1971).

Ähnlich intensive landwirtschaftliche Nutzung liegt bei den anderen Standorten nicht vor. Zusammenfassend ist also festzustellen, daß die "Podzólico Vermelho Amarelo"-Böden die nährstoffärmsten Böden des Untersuchungsgebietes sind.

Tabelle 11: Zusammenfassung der Elementgehalte in P. taeda-Nadeln und Baumhöhen der Standortsgruppen

Böden	Elemente-Nadeln (mg/g Tr. S.)					Höhe (m)
	N	P	K	Ca	Mg	h_{100}
Terra Rocha Estruturado	18,60	1,29	9,38	2,38	1,23	13,90 13,00-14,70
Diabas-Ranker	17,80	1,40	11,48	2,75	1,27	14,70
"Podzólico Vermelho Amarelo"	18,40	1,25	5,10	0,91	0,75	12,00 11,20-12,90
Sandstein-Latosol	19,80	1,30	8,95	1,57	1,10	13,80 12,70-15,70

Im natürlichen Verbreitungsgebiet von Pinus taeda und in Anbaugebieten in Australien ist die P-Versorgung noch weit geringer (BAUR, 1959; SWITZER und NELSON, 1972; LEAR und GOEBEL, 1976; Mc CARTHY und DAVEY, 1976). Der relativ hohe Mittelwert von 1, 3 mg/g auf brasilianischen Standorten ist im natürlichen Verbreitungsgebiet nur mit Hilfe von Düngungsmaßnahmen zu erzielen (Mc CARTHY und DAVEY, 1976).

Der relativ hohe N-Spiegel der untersuchten Pinus taeda-Bestände und die niedrigen P-Werte ergeben für die meisten Untersuchungsbestände höhere N/P-Quotienten als in der Literatur angegeben werden. In der vorliegenden Arbeit variieren die Werte zwischen 12, 5 und 18, 1. Lediglich bei einem Bestand mit N/P-Quotient von 18 bedingt ein hoher Stickstoffgehalt (23, 5 mg/g) den Anstieg des Quotienten, während sonst immer die niedrigen P-Werte Ursache sind. Als Mittelwert unserer Untersuchungsbestände ergibt sich ein N/P-Quotient von 14, 8. Zwischen N/P-Quotient und Wuchsleistung ist keine Korrelation erkennbar.

In nicht gedüngten Pinus taeda-Beständen in den USA liegen die N/P-Quotienten nach Mc CARTHY und DAVEY (1976) und LEAR und GOEBEL (1976) zwischen 10, 5 (bei N-Mangel) und 13, 5 (bei P-Mangel); der Durchschnittswert gut wüchsiger Bestände in den USA beträgt 11, 8 (SWITZER und NELSON, 1972). Gefäßkulturversuche ergaben für bestes Wachstum Werte von 12, 1 - 12, 8, wobei P- und N-Versorgung gut waren. Die Bodenanalysen auf P sind für die untersuchten Standorte wenig aussagekräftig. Die P(total)- Gehalte sind mit 420 ug/g Bodentrockensubstanz relativ hoch für subtropische Tieflandsböden. Es ist jedoch fragwürdig, hieraus immer eine gute Versorgung der Bestände zu postulieren, wenngleich BAUR (1959) 70 ug/g T.S. P(total) als Mangelgrenze ansetzt. Die Verfügbarkeit von P dürfte entsprechend der Dynamik im Mineralboden ziemlich verschieden sein. Die auf anderen Standorten oft aussagekräftigen P-Werte im Citronensäureextrakt sind im Untersuchungsgebiet nur beschränkt aussagefähig, zumindest was die Differenzierung der Standorte anlangt. Insgesamt ist der citronensäurelösliche Anteil im oberen Mineralboden der Untersuchungsstandorte mit Maximalwerten von 3, 2 ug/g außerordentlich niedrig. Dies

Tabelle 12: Elementgehalte im Citronensäureauszug; Mittelwerte der Standortsgruppen

	Citronensäurelöslich			ug/g T. S. Boden
	P	K	Ca	Mg
"Terra Rocha Estruturada"	2,3	70	853	180
Diabas-Ranker	3,2	31	1196	201
"Podzólico Vermelho Amarelo"	1,7	10	40	8
Sandstein-Latosol	2,8	26	101	24

erhellt aus dem Vergleich mit der von MOLL (1977) bei 45 ug/g angenommenen Mangelgrenze. Auch die Bestimmungen des "verfügbaren P" nach brasilianischen Standardmethoden ergab nur sehr geringe Werte. Vermutlich besitzt Pinus taeda über ihre Mykorrhiza ein hohes P-Aneignungsvermögen.

Die Gehalte an K, Ca und Mg in den halbjährigen Nadeln sind eng und positiv mit der Wuchsleistung korreliert. K und Mg tauchen mit einigen Nadelspiegelwerten klar in den Mangelbereich, so daß eine ursächliche Verknüpfung zwischen der Versorgung mit diesen beiden Nährelementen und dem Wachstum der untersuchten Bestände gegeben ist.

Aufgrund dieser gleichgerichteten Tendenz der 3 Elemente ist die Variation der Verhältnisse zwischen diesen (K/Ca bzw. Ca/Mg) relativ gering. Es zeigen sich keine signifikanten Korrelationen zwischen K/Ca- oder Ca/Mg-Verhältnis mit der Wuchsleistung. Die K/Ca-Quotienten liegen zwischen 3,7 und 8,7. Diese Spanne deckt sich weitgehend mit Bereichen, die in Anbaugebieten von Pinus taeda in den USA vorliegen: SWITZER und NELSON (1972) geben für "Normalbedingungen" ein K/Ca-Verhältnis von 3,6 an; FOWELLS und KRAUSS (1959) fanden K/Ca-Verhältnisse von 5,1 bzw. 10,7 bei Pinus taeda-Sämlingen mit optimalem Wachstum; WAIL et al. (1961) analysierten in gutwüchsigen Beständen auf jungen vulkanischen

Böden mit hoher Basenanlieferung in Tanganyika ein K/Ca-Verhältnis von 2,6. Nur unter ungünstigen Bedingungen verengt sich das K/Ca-Verhältnis stark: So berichten Mac CARTHY und DAVEY (1976) von Werten um 2,3 und LEAR und GOEBEL (1976) auf stark erodierten Böden von Quotienten um 1,0. Auf derartigen Standorten ist offenbar bei ausreichender Calciumversorgung das Kaliumangebot sehr gering. Es ist verständlich, daß auf den südbrasilianischen Untersuchungsstandorten der K/Ca-Quotient keinen Einfluß auf das Wachstum zeigt, wenn man von einem niedrigen Calciumbedarf von Pinus taeda ausgeht. Nur Baumarten mit offenbar hohem Calciumbedarf wie die europäische Tanne lassen bei stärkeren Verschiebungen im Kalium- und Calciumangebot Beziehungen zum Wachstum erkennen (REHFUESS, 1968).

Die Ca/Mg-Quotienten liegen auf unseren Untersuchungsflächen zwischen 1,0 und 2,5. Derartige Werte entsprechen den von SWITZER und NELSON (1972) mit 1,6 oder den schon erwähnten fruchtbaren Standorten in Tanganyika (3,2). Die Ergebnisse der Bodenanalysen korrespondieren bei K, Ca und Mg überwiegend gut mit der nadelanalytisch festgestellten Versorgung der Bestände mit diesen Elementen. Vor allem der Citronensäureextrakt ist zur Charakterisierung des Angebots an Kalium, Calcium und Magnesium auf den Böden des Untersuchungsgebietes sehr aussagekräftig. Es lassen sich aufgrund der gezeigten Beziehungen vorläufige Grenzwerte aufstellen: Kalium mindestens 10 ug/g, Calcium mindestens 30 ug/g, Magnesium mindestens 10 ug/g. Unterhalb dieser Werte ist mit wachstumsbegrenzendem Mangel zu rechnen. Aufgrund des Kurvenverlaufs der Beziehung zwischen K(citr.) und den Nadel- bzw. Wuchsleistungsdaten und der Parallelität zwischen Kalium und den Erdalkalien erweist sich die Bestimmung von Kalium im Citronensäureextrakt als einfache Möglichkeit zur Abgrenzung von aufforstungsfähigen Standorten. K(citr.) hat gleichsam "Indikatorfunktion".

Im Vergleich zu anderen Anbaugebieten von Pinus taeda liegen die genannten Grenzwerte durchweg tiefer. Dies gilt auch im Vergleich zu den von MOLL (1977) für europäische Verhältnisse genannten Daten.

Als besonders günstig sind die Diabas-Standorte mit früheren Araukarienbeständen zu bewerten. Hier ist das beste Wachstum zu beobachten (mittlere Höhe von 13,9 m). Selbst die kleinflächig vorkommenden Bestände mit nur 0,2 m Entwicklungstiefe des Bodens zeigen noch gutes Wachstum. Diese ehemaligen Araukarienstandorte erscheinen ausgezeichnet geeignet für einen Kiefernanbau. Dies steht im Einklang mit einer früher von van GOOR (1965) ausgesprochenen Empfehlung. Vielleicht ist dabei auch zu berücksichtigen, daß diese Standorte nur geringe Anteile löslichen Aluminiums enthalten (DIVISÃO DE PESQUISA PEDOLÓGICA, 1971). Allerdings ist bekannt, daß besonders Araucaria empfindlich auf zu hohe Al-Konzentrationen in der Bodenlösung reagiert, während Pinus taeda offenbar extrem hohe Gehalte gut verträgt (s. Kap. 6.3.).

Auf den Latosolen gibt es keine Wachstumsprobleme. Die Standorte zeigen überraschend gute Wuchsleistungen der Bestände, obwohl ihr Nährelementangebot geringer ist als auf Terra Roxa oder Diabas-Ranker. Allerdings ist auf den Latosol-Standorten die Streuung des Höhenwachstums der Bestände relativ groß. Dies dürfte durch die vorherige Landnutzung beeinflußt sein. Einige Standorte unterlagen vermutlich früher einer landwirtschaftlichen Nutzung ohne Düngung, mit hohem Nährstoffentzug und eventueller Erosion. Dies hat sich auch entsprechend auf den Humusgehalt ausgewirkt (s. Kap. 6.6.), was wiederum die Nährstoffversorgung beeinflußt.

Etwaige Meliorationsmaßnahmen oder Düngungen wären nur auf Podzólico Vermelho Amarelo -Standorten nötig. Man könnte an eine Düngung mit dolomitischem Kalk und/oder Kalimagnesia denken. Dies wäre vor allem für Pinus taeda-Bestände auf früher landwirtschaftlich genutzten Böden eine Lösung. Nach den Angaben von SWITZER und NELSON (1972) entsteht bei Pinus taeda-Beständen sehr bald, d. h. in etwa 10 Jahren, ein "Recycling-System", so daß schon bei geringen Düngergaben ein gutes Wachstum der Bestände erhalten bleibt. Nach LEAR und GOEBEL (1976) werden im Alter von 10 Jahren im Bestand dem Boden jährlich 16,2 kg/ha N, 22 kg/ha P, 4,4 kg/ha K, 18,0 kg/ha Ca und 4,8 kg/ha Mg mit dem Streufall in 4000 kg/ha Trockenmasse (METZ, 1952) zugeführt.

Diese Mengen dürften sich bei Kalium noch beträchtlich erhöhen durch den auf dem Wege der Kronenauswaschung zurückgeführten Anteil. Ein funktionierendes Recycling setzt natürlich einen guten biologischen Abbau der Streu voraus, was nach den bisherigen Beobachtungen nur bedingt gegeben ist. Hier müßten noch weitere Untersuchungen ansetzen.

Wenn wegen ökonomischer Einschränkungen Meliorations- oder Düngungsmaßnahmen nicht durchführbar sind und trotzdem mit Pinus-Arten aufgeforstet werden soll, wäre der Anbau von Pinus palustris ein anderer Weg. Diese Baumart stellt noch geringere Ansprüche an den Boden als Pinus taeda (GOLFARI, 1971). Sie produziert zwar weniger Biomasse (also auch weniger Streu), die Bestände bleiben aber licht, so daß sich eine Krautschicht entwickeln kann. Dadurch ist der Streuabbau begünstigt. Das erwähnte Recycling der Nährelemente könnte in Beständen dieser Baumart daher besser in Gang kommen.

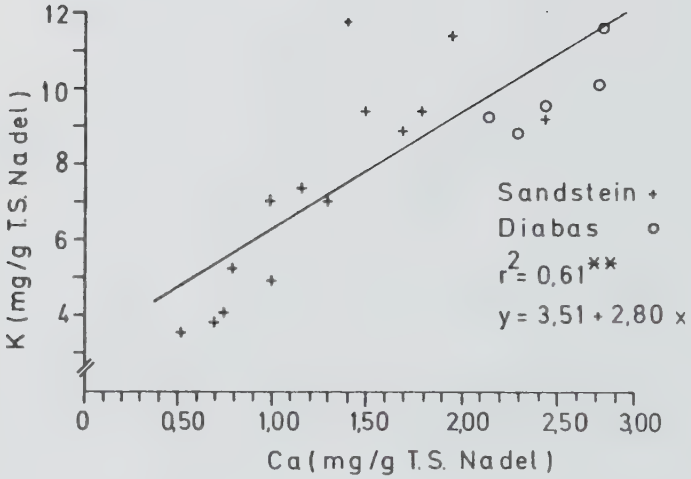

Abb. 21: Beziehung zwischen Kalium-und Calcium Gehalten in P. taeda Nadeln

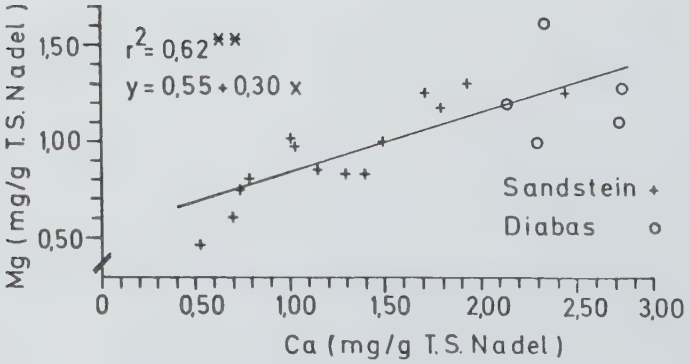

Abb. 22: Beziehung zwischen Calcium- und Magnesium Gehalten in P. taeda Nadeln

6.2. Mikronährelemente

Die Analysen erfolgten an den gleichen Proben, die zur Ermittlung der Makroelementgehalte herangezogen wurden. Die Bestimmungsmethoden sind in Kap. 5.5. beschrieben. In den Mineralbodenproben wurden nur die Gesamtgehalte bestimmt.

Chlor und Molybdän wurden nicht analysiert, da keine wachstumsdifferenzierende Beeinflussung durch diese Nährelemente im Untersuchungsgebiet zu erwarten war

6.2.1. Eisen

Die Fe-Versorgung der untersuchten Bestände ist überall sehr gut, was angesichts der Bodenverhältnisse zu erwarten war. Die Gehalte der halbjährigen Nadeln variieren zwischen 130 und 210 ug/g (siehe Tab. 14) und zeigen keine Beziehung zur Wuchsleistung. Im Gegensatz zu anderen Nährelementen läßt sich bei Fe keine Gruppierung der Nadelgehalte in Abhängigkeit vom Ausgangsgestein erkennen.

Fe-Mangel in Kiefernbeständen konnte bisher nur in seltenen Fällen nachgewiesen werden. Ursache ist meistens ein zu hoher pH-Wert des Bodens oder auch Immobilisierung als Fe-Oxid. Nach ZÖTTL und TSCHINKEL (1971) liegen die Werte für den Mangelbereich bei 30 ug/g T.S in den Nadeln.

Bei den Werten der Streulage macht sich eine gewisse indirekte Fe-Anreicherung gegenüber den halbjährigen Nadeln bemerkbar. Diese Differenz ist schwach signifikant. Hoch signifikant ist die Differenz der Fe-Gehalte zwischen L- und F-Lage. Die F-Lage ist sehr reich an Fe und erreicht Maximalwerte über 4000 ug/g (siehe Tabelle 14). Eine solche Fe-Anreicherung in der F-Lage ist auch von LENTSCHNIG und CZERNEY (1968), BRUM (1979) sowie JORGENSEN und WELLS (1973) gefunden worden. JORGENSEN und WELLS (1973) führen die in den Humuslagen nach unten

Tabelle 13: Spurenelementgehalte im Mineralboden und P. taeda-Nadeln (Mittelwerte der Standortsgruppen)

	DIABAS				SANDSTEIN			
	"Terra Rocha"		Ranker		"Podzólico V. Amarelo"		Latosol	
	Boden	Nadeln	Boden	Nadeln	Boden	Nadeln	Boden	Nadeln
Cu	176	6,6	165	70	23	4,9	38,8	5,0
Fe	132000	156	133000	133	25000	132	47000	175
Mn	1818	353	1600	350	263	364	187	322
Zn	107	63	120	73	19	20	33	37

(alle Angaben in ug/g T.S.)

fortschreitende Fe-Anreicherung auf den Abbau der organischen Substanz zurück, lassen aber die Möglichkeit der biologischen Einarbeitung von Fe-reichem Mineralboden offen.

Die Fe-Gesamtgehalte im Mineralboden zeigen eine deutliche Differenzierung nach Art des Ausgangsgesteins. Wie zu erwarten, wurden die höheren Fe-Gehalte auf den Diabas-Standorten gemessen; sie betrugen mindestens das 5-fache der Gehalte auf "Podzólico Vermelho Amarelo" und das 3-fache der Werte von Sandstein-Latosolen (s. Tabelle 13).

Zwischen Nadelgehalt und Fe-Gesamtgehalt im Boden konnte keine Korrelation nachgewiesen werden. Offenbar sind die leicht verfügbaren Fe-Anteile in den einzelnen Bodensubstraten nicht gerichtet verschieden. Solche Unterschiede zwischen Sandstein und Basalt (in unserem Fall Diabas) sind in Südbrasilien die Regel (SANTOS FILHO, 1977).

6.2.2. Mangan

Auch Mangan wird auf allen Standorten offenbar in ausreichender Menge angeboten. Die halbjährigen Nadeln haben durchweg Gehalte von einigen

Hundert ug/g Mn. Obwohl für Pinus taeda keine speziellen Untersuchungen vorliegen, ist der Mangelbereich für Mn unterhalb etwa 10 ug/g T. S. anzunehmen (STONE, 1968) Ein solcher Bereich wird auf keinem Standort auch nur annähernd erreicht. Diese Situation ist verständlich, weil im Untersuchungsgebiet weder Böden mit hohem pH-Wert, d. h. hoher Manganfestlegung noch Böden mit sehr niedrigen Mn-Vorräten vorkommen.

Die mäßig sauren Böden des Untersuchungsgebietes mit teilweise deutlicher Sesquioxidanreicherung liefern offenbar eher überdurchschnittlich hohe Manganmengen an. Die hier festgestellten Gehalte zwischen rund 200 - 500 ug/g in den halbjährigen Nadeln liegen höher als in anderen untersuchten Gebieten Brasiliens. In den USA hatte DIXON (1964) Werte zwischen 300 und 400 ug/g Mn gefunden.
Wie bei Eisen sind auch bei Mangan die Gehalte der Nadeln nicht mit der Wuchsleistung korreliert. Auch nach den gesteinsbedingten Standortsgruppen zeigt sich keine Differenzierung der Mn-Gehalte in den Nadeln. Offensichtlich liegt überall eine gute Versorgung vor.

Die Gesamtwerte des Mineralbodens lassen andererseits eine sehr starke Differenzierung zwischen Sandstein-Böden und Diabas-Böden erkennen. Aus Tab. 13 gehen die ebenso wie bei Eisen wesentlich höheren Gehalte des Mineralbodens aus Diabas deutlich hervor.

Zwischen den Mn-Gehalten der halbjährigen Nadeln und den Humuslagen ergeben sich schwache positive Korrelationen (siehe Abb. 23 und 24). Die Mn-Gehalte der L-Lage sind weit höher als die der halbjährigen Nadeln; vermutlich findet mit zunehmendem Nadelalter bereits eine Mn-Anreicherung statt (vgl. FIEDLER et al., 1973, BAUMEISTER und ERNST, 1978, BEATON et al., 1965), die dann in der Streunadel kumuliert. Die F-Lage liegt etwas niedriger mit ihren Mn-Werten, worin sich bereits eine gewisse Mobilisierung dieses Elements wiederspiegelt. Dabei erwies sich, daß nur der Gehalt in dieser Lage mit dem Gehalt in den Nadeln signifikant korreliert ist ($r^2 = 0,44^{++}$).

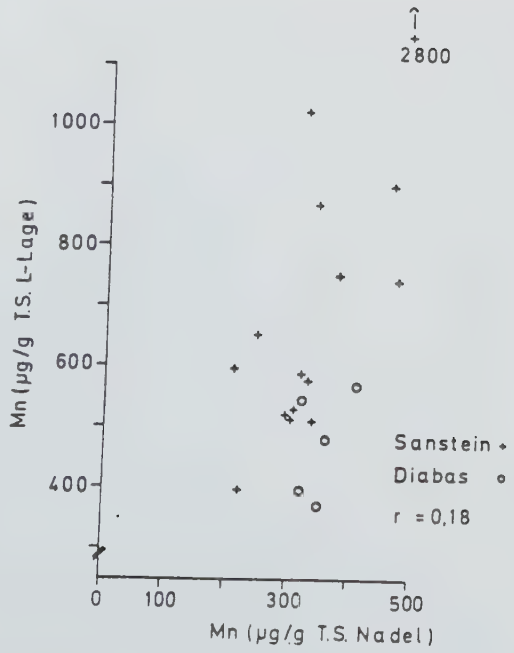

Abb. 23: Zusammenhang zwischen den Mn-Gehalten in P. taeda-Nadeln und L-Lagen

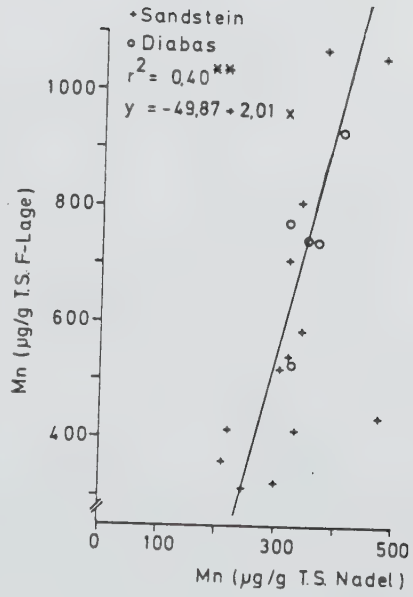

Abb. 24: Beziehung zwischen den Mn-Gehalten in P. taeda-Nadeln und F-Lagen

6.2.3. Zink

Zink weist als einziges der Mikronährelemente eine hochsignifikante positive Korrelation zur Wuchsleistung der Bestände auf. Abb. 25 zeigt diese ziemlich straffe Beziehung, die über eine ziemlich weite Spanne der Zn-Gehalte läuft. Diese im Untersuchungsgebiet gefundenen Zn-Gehalte entsprechen denen anderer Autoren: VAIL et al., 1961, DIXON und WEAR, 1964, fanden Zn-Gehalte von 44-45 ug/g. Nach WHITE und PRITCHETT (1970) sowie WHITE et al. (1970) liegt der "normale" Zn-Gehalt bei Pinus taeda zwischen 12 und 99 ug/g. Von anderen Kiefernarten sind Zn-Gehalte zwischen 15 und 125 ug/g bekannt (STONE, 1968).

Es stellt sich die Frage, ob die niedrigen Zn-Gehalte um 10 ug/g der schlechtwüchsigsten Bestände des Untersuchungsgebiets bereits einen Zn-Mangel bedeuten. Für Pinus taeda gibt es noch keine diesbezüglichen Angaben. Bei verwandten Pinus-Arten gelten Zn-Gehalte unter 5 ug/g als mangelhaft, Werte zwischen 5 und 11 ug/g als "niedrig" (STOATE, 1950). Diese Angaben stammen vor allem von Pinus radiata. Nach ZÖTTL und TSCHINKEL, 1971 liegt bei Pinus-Arten der Zn-Gehalt bei guter Versorgung allgemein zwischen 10 und 80 ug/g. Es ist somit nicht auszuschließen, daß die schlechtwüchsigsten Sandsteinstandorte in Südbrasilien unter Zn-Mangel leiden. Diagnostische Düngungsversuche könnten hier weiteren Aufschluß geben.

Eine gewisse Stütze erfährt die nadelanalytisch ermittelte Abhängigkeit des Wachstums von der Zn-Versorgung durch die Analysendaten des Mineralbodens. Zwar besteht keine klare Korrelation zwischen dem Zn-Gesamtgehalt des Mineralbodens und der Wuchsleistung; es findet sich jedoch eine Andeutung für die Abhängigkeit beider Größen im Bereich der Sandsteinstandorte.

Auch die Darstellung des Zusammenhangs zwischen Zn-Gehalt im Boden und in den Nadeln ergibt ein ähnliches Bild (Abb. 26). Die Streuung - vor allem im Bereich geringer Zn-Gehalte - ist jedoch außerordentlich hoch.

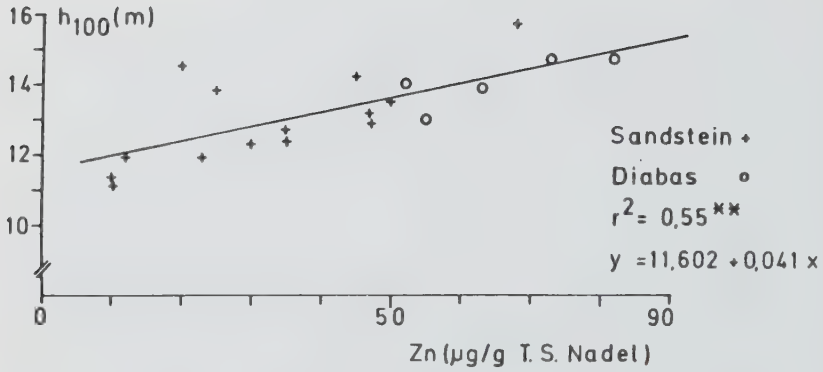

Abb. 25: Beziehung zwischen Zn-Gehalt in P. taeda-Nadeln und Baumhöhe

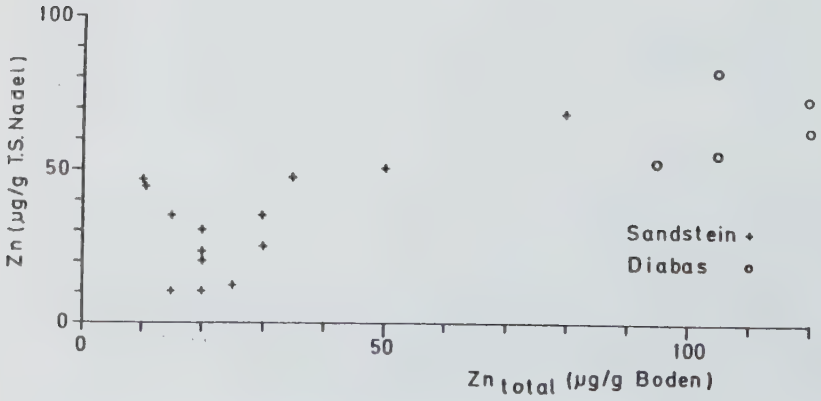

Abb. 26: Zusammenhang zwischen Zn-Gesamtgehalt im oberen Mineralboden und Zn-Gehalt in P. taeda-Nadeln

Zweifellos sind diese Beziehungen wiederum stark durch das Ausgangsgestein der Böden bedingt. Es läßt sich jedoch zusätzlich eine gesicherte Beziehung zwischen Humusgehalt des Bodens und dem Zn-Versorgungsgrad der Bestände aufzeigen (Abb. 35). Die Böden mit höherem Humusgehalt (zu denen nicht nur die Diabas-Standorte zählen) zeigen eine wesentlich bessere Zn-Versorgung der Bäume. Derartige Beziehungen zwischen Zn-Anlieferung und Humushaushalt sind verständlich, da pflanzenverfügbares Zn in hohem Ausmaß in Form organischer Komplexe vorliegen kann. Dieser Befund unterstreicht die große Bedeutung des Humushaushaltes subtropischer Standorte für die Nachlieferung bzw. Verfügbarkeit von Nährelementen (siehe auch Kap. 6.4.).

Hinsichtlich der Beziehungen zwischen Elementgehalten in den Nadeln und in den Humuslagen verhält sich Zn wie das anschließend behandelte Cu: Es ist eine enge Korrelation zwischen den genannten Variablen nachzuweisen (Abb. 27 und 28). In den Humuslagen liegen die Zn-Gehalte nur etwa halb so hoch wie in den halbjährigen Nadeln (siehe auch Tab. 14). Diese Differenz dürfte auf Auswaschung und vielleicht auch Bildung löslicher organischer Zn-Komplexe in den Humuslagen zurückzuführen sein.

6.2.4. Kupfer

Neben Zink ist Kupfer das einzige Mikronährelement mit signifikanter positiver Beziehung zwischen den Gehalten der Nadeln und der Wuchsleistung (Abb. 29). Alle Cu-Gehalte liegen offenbar im Bereich guter Versorgung. Dieser Bereich liegt für Pinus taeda nach WAIL et al. (1961) zwischen 5 - 22 ug/g, nach WHITE et al. (1970) zwischen 2 - 33 ug/g. Zwar gibt es für die Mangelbereichsgrenze bei Pinus taeda keine präzisen Angaben; bei anderen Kiefernarten beginnt der Mangelbereich etwa bei 2 ug/g (STONE, 1968; ZÖTTL und TSCHINKEL, 1971). Dies dürfte auch für Pinus taeda gelten. Die im südbrasilianischen Untersuchungsgebiet gefundenen Werte liegen alle deutlich über diesem Bereich.

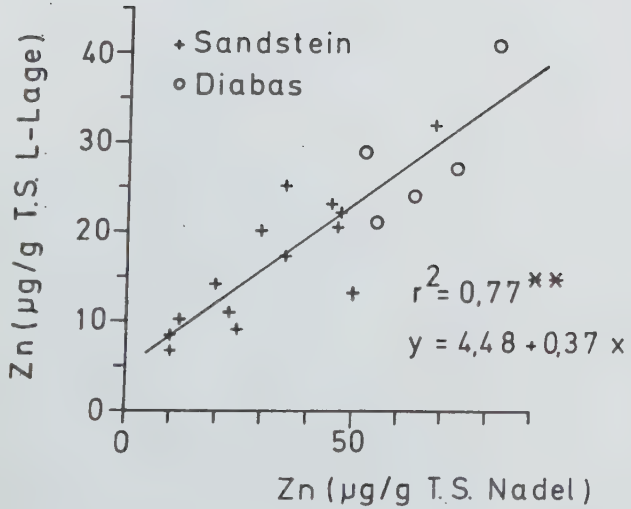

Abb. 27: Beziehung zwischen den Zn-Gehalten in den P. taeda-Nadeln und L-Lagen

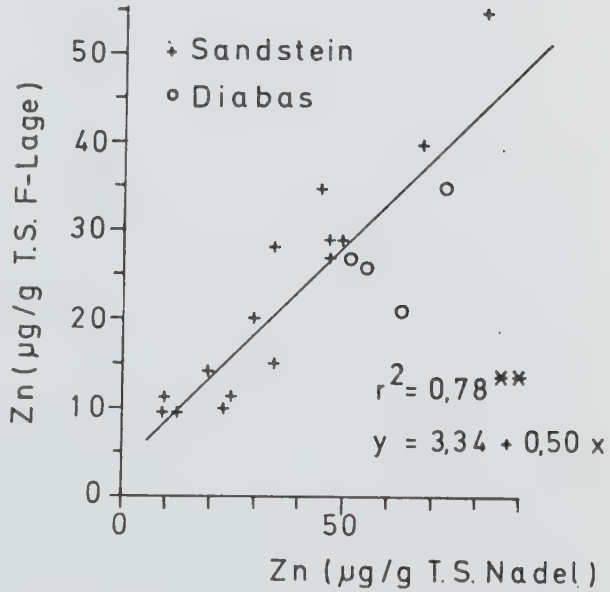

Abb. 28: Beziehung zwischen den Zn-Gehalten in den P. taeda-Nadeln und F-Lagen

Auch bei der Verteilung der Cu-Gehalte zeigt sich eine Abhängigkeit vom Gesteinstyp. Die höchsten Gehalte liegen auf Diabas. Interessant ist aber, daß der höchste Cu-Gehalt der halbjährigen Nadeln auf dem Sandstein-Latosol mit dem besten Wachstum zu finden ist. Dieser Standort hat gleichzeitig den höchsten Humusgehalt im Mineralboden. Man könnte daraus - ähnlich wie bei Zink - auf einen positiven Einfluß des Humusgehalts auf die Mikronährelementversorgung schließen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß insgesamt eine signifikante positive Beziehung zwischen Humusgehalt und Cu-Gehalt der Nadeln besteht ($r = 0,60^{++}$). Allerdings ist anzumerken, daß nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1976) die organische Substanz keinen positiven Einfluß auf die Cu-Aufnahme durch die Pflanze hat. Diese Untersuchungen beziehen sich jedoch auf außerordentlich humusreiche Böden Mitteleuropas, deren organische Substanz in der Regel sehr geringe Cu-Gehalte aufweist. Meist ist in diesen Böden dann das organisch gebundene Kupfer in hohem Anteil vertreten und so stark gebunden, daß es nur schwer pflanzenaufnahmbar ist (BAUMEISTER, 1978; FINK, 1966). Demgegenüber sind die Humusgehalte des Untersuchungsgebietes in Südbrasilien viel niedriger (1,7 - 4,9 %). Es wäre zu untersuchen, inwieweit Kupfer in diesen Böden als Chelat und damit pflanzenaufnehmbar vorliegt.

Zwischen den Gesamtgehalten an Kupfer im Mineralboden und der Wuchsleistung zeigt sich keine Korrelation. Die Cu-Gesamtgehalte unterscheiden sich sehr stark je nach Art des Ausgangsgesteins. Die im Diabasgebiet ermittelten Werte variieren zwischen 160 und 190 ug/g, im Sandsteingebiet hingegen zwischen 10 und 40 ug/g (wobei der Spitzenstandort auf Sandstein-Latosol mit 115 ug/g deutlich herausfällt).

Auch zwischen den Cu-Gehalten im Mineralboden und dem Kupferversorgungsgrad der Nadeln besteht keine Beziehung. Gegenüber den großen gesteinsbedingten Unterschieden des Kupfergehalts im Mineralboden sind die Kupfergehalte der halbjährigen Nadeln weit weniger gespreitet. Außerdem überlappen sich die beiden gesteinsbedingten Gruppen deutlich.

Die Cu-Gehalte der halbjährigen Nadeln und der Streulage unterscheiden sich nur wenig. Beide Größen sind nicht signifikant miteinander korreliert

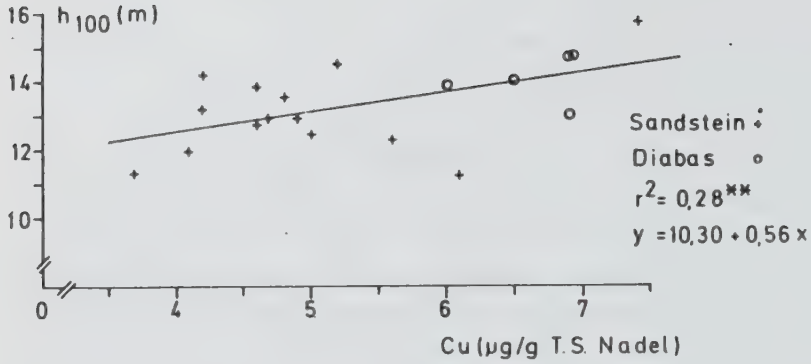

Abb. 29: Beziehung zwischen Cu-Gehalt in P. taeda-Nadeln und Baumhöhe

Dagegen ergibt sich ein gesicherter Unterschied zwischen den Cu-Gehalten der L- und F-Lagen (Tab. 14). Gleichzeitig ist die Korrelation zwischen Cu-Gehalt der halbjährigen Nadel und der F-Lage deutliche gesichert (Abb. 31). Erst in der F-Lage findet somit eine Cu-Anreicherung statt. Dieser Befund entspricht den Beobachtungen von JORGENSEN und WELLS (1973) auf verschiedenen Kiefernstandorten. Vermutlich spielt hier die Bildung stabiler organischer Kupferkomplexe in der F-Lage eine Rolle. Damit würde die oben besprochene Beziehung zwischen Cu-Gehalt und Humusgehalt eingeleitet.

6.2.5. Bor

Bor gehört zusammen mit Eisen und Mangan zu den Mikronährelementen, die keine Korrelation zwischen Nadelgehalten und Wuchsleistung der Bestände zeigen. Die Borgehalte liegen in den halbjährigen Nadeln zwischen 10 - 32 ug/g. dabei stammen die Werte des unteren Bereichs keineswegs von den Beständen mit schlechter Wuchsleistung. Vielmehr finden sich auch bei geringen B-Gehalten sehr gute Wuchsleistungen (Mittelhöhe 13,0

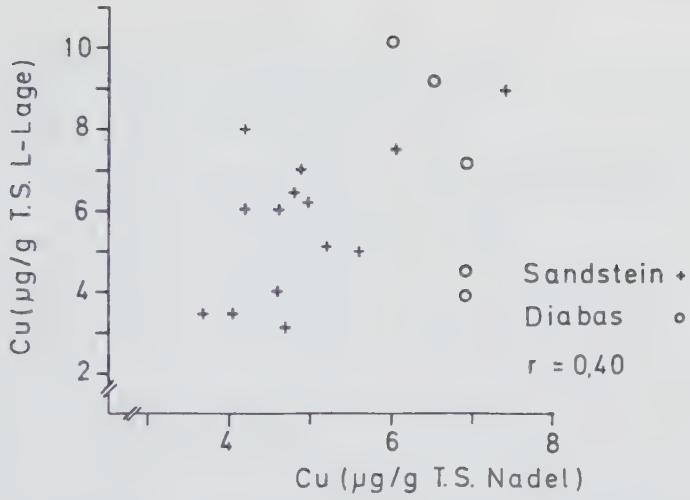

Abb. 30: Zusammenhang zwischen dem Cu-Gehalt in P. taeda-Nadeln und L-Lagen

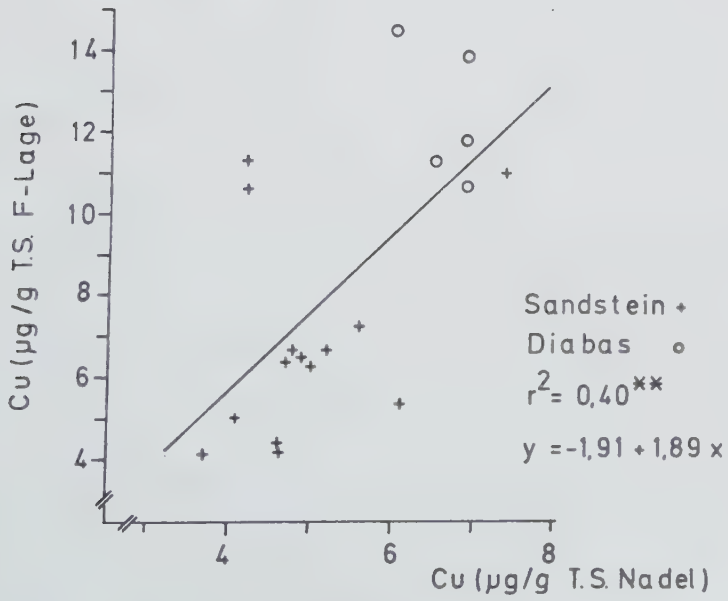

Abb. 31: Beziehung zwischen dem Cu-Gehalt in P. taeda-Nadeln und L-Lagen

und 15,7 bei B-Gehalten 10 - 12 ug/g) oder umgekehrt geringe Wuchsleistungen mit hohen B-Werten (Mittelhöhe 11,2 und 11,9 mit B-Gehalten von 22-26 ug/g). Dieses Ergebnis deutet darauf hin, daß der Bereich mangelhafter Borversorgung bei Pinus taeda erst bei geringeren Werten beginnt als bisher angenommen wurde. So liegt dieser Mangelbereich nach WAIL (1961) bei Werten unter 16 ug/g. Fälle von wachstumsbegrenzender schlechter Borversorgung sind in brasilianischen Aufforstungsgebieten durchaus bekannt (van GOOR, 1965a, b; BLUM und HILDEBRAND, 1977). Allerdings handelt es sich dort meist um Gebiete mit Cwa-Klima (also regelmäßigen Trockenperioden), während die hier untersuchten Pinus taeda-Standorte überwiegend im Cfb-Klima (also mit regelmäßiger Niederschlagsverteilung) liegen. Bekanntlich besteht ein enger Zusammenhang zwischen Borversorgung und Wasserhaushalt; Trockenheit verschärft Bormangel bzw. läßt ihn erst deutlich werden. Die von van GOOR (1965) untersuchten Bestände von Pinus elliottii zeigten bei Bormangel Gehalte in den Nadeln von 4,3 ug/g. Die Borversorgung der untersuchten südbrasilianischen Bestände ist also offenbar durchweg ausreichend. Es ist anzunehmen, daß die Borvorräte in Gestein bzw. Boden ausreichend hoch sind und nicht durch Bodenabtrag oder anthropogene Degradation (siehe BLUM und HILDEBRAND, 1977) stark reduziert worden sind.

Die Analysendaten ergeben keine Anhaltspunkte für eine Korrelation der Borgehalte in den Nadeln und in den Humuslagen. Gegenüber 20 ug/g Bor in den halbjährigen Nadeln (Mittelwert) weisen die L- und F-Lagen nur ca. 6 ug/g Bor auf (Tab. 16). Die beiden Lagen unterscheiden sich in ihrem Borgehalt nicht signifikant. Diese niedrigeren Borgehalte in den Humuslagen dürften auf einsetzende Auswaschung zurückzuführen sein. Offenbar verbleiben aber ausreichende Mengen an löslichem Bor im Wurzelbereich der Pinus taeda-Bestände und sichern so eine befriedigende Versorgung mit diesem Mikronährelement.

Tabelle 14: Mittelwerte der Nährelementgehalte in Nadeln und organischen Auflagen von P. taeda-Beständen mit dem dazugehörigen Signifikanzniveau

		Mittelwert (extreme) (ug/g T.S.)	Signifikanz
Fe	Nadeln (N)	155 (130-210)	L-N: t = 2,28^{+}
	L-Lage (L)	447 (207-2610)	F-N: t = 5,56^{++}
	F-Lage (F)	1500 (302-4910)	F-L: t = 4,09^{++}
Mn	Nadeln (N)	343 (210-498)	L-N: t = 3,40^{++}
	L-Lage (L)	728 (372-2800)	F-N: t = 6,08^{++}
	F-Lage (F)	626 (315-1070)	L-F: 6 = 0,80 n. s.
Zn	Nadeln (N)	41 (10- 83)	N-L: t = 6,56^{++}
	L-Lage (L)	20 (7- 32)	N-F: t = 6,15^{++}
	F-Lage (F)	24 (10- 40)	F-L: t = 3,27^{++}
Cu	Nadeln (N)	5,4 3,7 - 7,4	L-N: t = 1,53 n. s.
	L-Lage (L)	6,1 (3,1-10,1)	F-N: t = 4,51^{++}
	F-Lage (F)	8,3 (4,1-14,5)	F-L: t = 3,39^{++}
B	Nadeln (N)	20 9 - 33	N-1: t = 8,35^{++}
	L-Lage (L)	5,8 1,5-10	N-F: t = 7,62^{++}
	F-Lage (F)	7 3,3-11	F-L: t = 2,20^{+}

6.2.6. Zusammenfassende Diskussion der Mikronährelemente

Die Elemente Fe und Mn sind auf allen Standorten des Untersuchungsgebietes in ausreichenden Mengen vorhanden; Korrelationen mit der Wuchsleistung lassen sich nicht nachweisen. Die Gehalte beider Elemente in den Nadeln bewegen sich durchweg im Bereich guter Versorgung. Probleme in der Versorgung mit diesen beiden Mikronährelementen sind im Untersuchungsgebiet nicht zu erwarten.

Die Beurteilung der Zn-Versorgung ist problematisch, da aus der Literatur kaum Daten über die Grenze des Mangelbereichs vorhanden sind. Außerdem variieren die Grenzwerte nach Baumart offensichtlich beträchtlich (STONE, 1968). Nach STOATE (1950), liegt der Mangelbereich für Pinus-Arten zwischen 5-11 ug/g; allerdings scheint Pinus radiata weniger anspruchsvoll (Mangelbereich 1-5 ug/g). Werte guter Versorgung liegen sicherlich zwischen 10-80 ug/g (ZÖTTL und TSCINKEL, 1971; SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1976). In diesem Bereich liegen alle Zn-Gehalte der vorliegenden Untersuchung; die niedrigsten Werte streifen mit 10 - 12 ug/g bestenfalls die Grenze des Mangelbereichs. Trotzdem ist eine signifikante Beziehung zwischen Zn-Gehalt und Wuchsleistung erkennbar. Außerdem ergibt sich eine signifikante Korrelation zwischen Humusgehalt des oberen Mineralbodens und Zn-Gehalt der Nadeln ($r^2 = 0,62^{++}$). Vermutlich ist Zn auf den untersuchten Standorten in hohem Ausmaße im Humus des Mineralbodens organisch gebunden und damit langsam pflanzenverfügbar. Der Humusgehalt des obersten Mineralbodens mag daher als Kofaktor wirksam sein und die erwähnte enge Korrelation bedingen.

Die Festlegung des Mangelbereichs für Zn bei Pinus taeda ist auch deshalb erschwert, weil auf den Untersuchungsstandorten bei schlechter Zn-Versorgung gleichzeitig K- und Mg-Mangel sowie schwache Ca-Versorgung gegeben ist. Man kann daher schwer entscheiden, welches Element bzw. welche Elemente tatsächlich wachstumsbegrenzend auftreten. Offenkundig ist die schlechte Zn-Versorgung auf den Podzólico Vermelho Amarelo-Böden mit Sandstein als Ausgangsmaterial. Außerdem ist damit zu rech-

nen, daß Bodenabtrag einen erhöhten Zn-Verlust bewirkt (STONE, 1968).

Cu wird auf allen Standorten ausreichend angeboten. Die positive und signifikante Korrelation mit der Wuchsleistung mag auch hier auf eine Wirkung des Bodenhumus als Kofaktor zurückzuführen sein. Es ist anzunehmen, daß organisch gebundenes Kupfer in den Böden des Untersuchungsgebiets langfristig eher verfügbar wird. Auf jeden Fall bewegen sich die Cu-Gehalte in den Nadeln durchweg im Bereich guter Versorgung.

Bei Bor finden sich auf einigen Standorten ausgesprochen niedrige Gehalte. Es läßt sich keine Korrelation mit der Wuchsleistung feststellen. Man kann davon ausgehen, daß im Untersuchungsgebiet bei Pinus taeda kein wachstumsbegrenzender Bor-Mangel nachzuweisen ist. Dies dürfte auf den ausgeglicheneren Bodenwasserhaushalt zurückzuführen sein im Gegensatz zu weiter nördlich im Staat São Paulo gelegenen Aufforstungen. Dort sind Trockenperioden weit ausgeprägter, die nach van GOOR (1965) und GURGEL-FILHO (1966) die Bor-Aufnahme herabsetzen, insbesondere auf Böden der Podzólico-Vermelho-Amarelo-Gruppe und Sandstein-Latosole. Die nördliche Begrenzung des potentiellen Anbaugebietes von Pinus taeda (und auch von Pinus elliottii) durch GOLFARI (1968/1971) steht im Einklang mit dieser klimabedingten Differenzierung der Bor-Versorgung. Tatsächlich zeigen die praktischen Erfahrungen der Forstwirtschaft im Staat São Paulo, daß die "Pionierbaumart" Pinus elliottii ebenso wie Pinus taeda in diesem Gebiet wenig erfolgreich waren. Man zieht deshalb in diesem Raum heute den Anbau von Pinus caribaea oder Eucalyptus-Arten vor.

Interessant ist die Feststellung, daß auch auf stärker erosionsgefährdeten Standorten im Untersuchungsgebiet durchaus normale B-Gehalte in den Nadeln gemessen wurden. Offensichtlich sind auf den Untersuchungsstandorten keine Beeinträchtigungen der Bor-Versorgung durch Bodenabtrag oder Bor-Verflüchtigung durch Brennen in stärkerem Ausmaße abgelaufen.

Interessant ist somit die Versorgung der Pinus taeda-Bestände im Untersuchungsgebiet mit Mikroelementen im allgemeinen ausreichend bis gut; problematisch erscheint lediglich die Versorgung mit Zn auf einigen Standorten. Hier sind aber noch weitere Untersuchungen erforderlich, bevor definitive Aussagen möglich sind.

6.3. Aluminium

6.3.1. Aluminiumgehalt in halbjährigen Nadeln, Mineralboden und Beziehungen zur Wuchsleistung

Aluminium kann in höheren Gehalten toxisch auf Pflanzen wirken. Die Böden des Untersuchungsgebietes sind allgemein reich an Al; seine Löslichkeit ist aufgrund der niedrigen pH-Werte hoch. Als möglicherweise schädlich wirkendes Element wurde Al daher in die Untersuchungen einbezogen.

Die Analysendaten bestätigen frühere unpublizierte Befunde, nach denen die Nadeln von Pinus taeda extrem hohe Al-Gehalte besitzen. Die früheren Untersuchungen ergaben für achtjährige Pinus taeda im Durchschnitt 1200 ug/g Al in halbjährigen Nadeln auf Sandstein-Latosol. Die Daten der vorliegenden Erhebungen schwanken zwischen 875 und 1375 ug/g in halbjährigen Nadeln (s. Tab. 15). Damit gehört Pinus taeda nach CHENERY und SPORNE (1975) zu den "Aluminium-Pflanzen", die Al-Gehalte über 1000 ug/g T. S. auszeichnen.

Tabelle 15: Al-Gehalte in Nadeln und Mineralboden sowie pH-Werte der Bodengruppen (P. taeda)

	halbj. Nadeln		Mineralboden			
	Al (ug/g T. S.)		Al (mg/g T. S.)		pH ($CaCl_2$)	
	extrem	mittel	extrem	mittel	extrem	mittel
Terra Rocha Estruturada	875-925	888	92-107	98	5,7-6,5	5,9
Diabas Ranker	-	925	-	87	-	6,5
Podzólico Vermelho Amarelo	875-1125	980	43-57	53	4,0-4,2	4,1
Sandstein Latosol	1075-1375	1180	35-114	71	4,0-4,4	4,1

Trotz dieser extrem hohen Al-Gehalte ist keine Beeinträchtigung des Wachstums erkennbar. Dies ergibt sich klar daraus, daß keine Beziehung zwischen Al-Gehalt der Nadeln und Wuchsleistung der Bäume zu erkennen ist und höchste Al-Gehalte der Nadeln gerade auch bei sehr gutwüchsigen Beständen zu beobachten sind (z.B. 1375 ug/g Al im Bestand mit Höhenwuchsleistung h_{100} = 13,80 m).

Zwischen den Gesamtgehalten an Al im obersten Mineralboden und den übrigen Daten besteht ebenfalls keine gesicherte Beziehung. Die Variation der Al-Gesamtgehalte ist besonders hoch bei den Sandstein-Latosolen (s. Tab. 15). Der Standort mit dem Maximalgehalt von 114 ug/g Al in der Bodentrockensubstanz hat die höchste Wuchsleistung. Zu den Gehalten der Nadeln ist, wie gesagt, keine Beziehung erkennbar. Eine solche Beziehung wäre auch nur zu erwarten, wenn lösliche Al-Fraktionen bestimmt worden wären.

Unsere Untersuchungen zeigen somit, daß Pinus taeda gegenüber hohen Al-Gehalten absolut resistent ist. Dies bedeutet nicht, daß diese Baumart auf allen Standorten extrem hohe Al-Gehalte in den Nadeln aufweist. Mac CARTHY und DAVEY (1976) haben in den Lowlands im Südosten der USA auf organischen Böden Gehalte um 270 ug/g in halbjährigen Nadeln von 6 Jahre alten Bäumen mit Mittelhöhe 1,60 m nachgewiesen. Extrem hohe Al-Gehalte (643-2173 ug/g T.S. Nadel) wurden auf australischen Al-reichen Böden bestimmt (HUMPHREYS und TRUMAN, 1961). Verwandte Kiefernarten wie Pinus silvestris sind vermutlich weniger tolerant. Dies gilt zumindest für Jungpflanzen, für die PRUSINKIEWICZ und KRZEMSEN (1974) im Alter von 2 Jahren 200 ug/g als Toxiditätsgrenze postulieren. FIEDLER et al. (1973) zeigen Gehalte von 140-490 ug/g T.S. Nadel in älteren Kiefern auf Buntsandstein des Pfälzer Waldes.

6.3.2. Al-Gehalt der halbjährigen Nadeln, L- und F-Lage

Beim Übergang der Nadeln in die L-Lage und F-Lage findet eine deutliche Anreicherung an Al statt. Tabelle 16 zeigt die Mittelwerte der Untersuchungsstandorte. Die Anreicherung ist weniger hoch als bei Eisen (s. Tab. 15). Aus Untersuchungen im natürlichen Verbreitungsgebiet von Pinus taeda liegen noch höhere Al-Gehalte im Auflagehumus vor: JÖRGENSEN und WELLS (1973) berichten aus North-Carolina von Werten zwischen 4400 und 9667 ug/g in der F-Lage von 50-jähriger Pinus taeda.

Tabelle 16: Vergleich der Al-Mittelwerte von Nadeln sowie L- und F-Lage in P. taeda-Beständen

	Mittelwert u (ug/g T.S.)	Signifikanz (t-berechnet)
Nadeln (N)	1041	N-L: t = 1,31 n.S.
L-Lage (L)	1152	N-F: t = 6,28^{++}
F-Lage (F)	2775	N-L: t = 5,89^{++}

6.4. Humusgehalt im obersten Mineralboden und Wuchsleistung

Der Humuskörper der Böden hat wichtige Funktionen für die Nährstoffanlieferung; besonders bedeutsam sind die Nährstoffsorption und die Speicherung in organischer Bindung. Beides gewinnt in tropisch-subtropischen Böden mit wenig sorptionskräftigen Tonmineralen und niedrigem Humusgehalt besondere Bedeutung.

Der "Humusgehalt im obersten Mineralboden" errechnet sich aus C-Analysen (trockene Verbrennung) von Mischproben aus 0 - 20 cm Bodentiefe durch Multiplikation mit dem Faktor 1,72 (siehe Kap. 5.4.) Nicht einbezogen in diesen humosen Mineralboden sind die L- und F-Lagen. Diese verdanken ihre Entstehung praktisch vollständig den aufgeforsteten Baumbeständen, während der Ah-Horizont überwiegend auf die Verhält-

nisse unter der Vegetation bzw. der Bodennutzung vor der Aufforstung zurückgeht. Der Humusgehalt des obersten Mineralbodens spiegelt somit weit eher als die L- und F-Lagen die "natürliche Fruchtbarkeit" der Standorte wider. Es erschien deshalb interessant, etwaige Beziehungen zwischen dem Humusgehalt des Mineralbodens und der Wuchsleistung bzw. Nährelementversorgung der Aufforstungsbestände zu untersuchen.

Generell zeigt sich eine positive Beziehung zwischen Humusgehalt des Mineralbodens und dem Wachstum der Untersuchungsbestände (Abb. 32). Natürlich scheint auch bei dieser Beziehung wieder der Einfluß des Ausgangsgesteins durch: Die Diabas-Standorte sind allgemein deutlich humusreicher als die Mehrzahl der Sandsteinstandorte. Dabei dürfte die auf Diabas stärkere Ton-Humus-Kopplung eine Rolle spielen. Außerdem ist die unterschiedliche frühere Landnutzung bzw. natürliche Vegetation von Bedeutung: Die Diabas-Standorte trugen überwiegend Araukarienwälder, während auf Sandstein schon früher wiederholte Brandrodung und Landnutzung ohne Düngung, verbunden mit deutlichem Bodenabtrag überwog. Es sind also gravierende Unterschiede im Humusgehalt des obersten Mineralbodens der verschiedenen Untersuchungsstandorte vorhanden, die sich auf die Bodenfruchtbarkeit auswirken.

Im einzelnen sind dabei die Makroelemente Stickstoff und Phosphor besonders betroffen. Die Gehalte beider Elemente stehen in enger positiver Beziehung mit dem Humusgehalt im obersten Mineralboden, sind also in den humusreicheren Böden in überproportionalem Anteil gespeichert. Die Diabas- und Sandsteinstandorte verzahnen sich bei der Beziehung zwischen Humusgehalt und Stickstoffgehalt weitgehend, während in der Beziehung zwischen Humus- und Gesamtphosphorgehalt eine deutliche Trennung beider Standortsgruppen zutage tritt (s. Abb. 33 und 34) Dazu ist zu bemerken, daß bei den Sandsteinstandorten die frühere Nutzung sehr verschieden war. Die Böden der Gruppe Podzólico Vermelho Amarelo und der Terra Roxa Estruturada sollten nach JORGE (1972) aufgrund ihrer Eigenschaften des Mineralkörpers höhere Humusgehalte aufweisen, sie sind aber größtenteils schon lange wenig pfleglich genutzt worden. Ihr Humusgehalt wurde dadurch

stark reduziert. Böden mit Textur-B-Horizont sollten nach JORGE (1972) 5 % - 30 % des Gesamtphosphors in organischer Bindung enthalten. Wahrscheinlich werden diese hohen Anteile in den Böden unserer Untersuchungsstandorte mit früherer landwirtschaftlicher Nutzung nicht erreicht.

Trotz der eindeutigen positiven Beziehungen zwischen Humusgehalt und Stickstoff- bzw. Phosphorgehalt des obersten Mineralbodens, die auch von anderen Autoren beobachtet wurden (WALKER, 1955; FIEDLER et al., 1973; BALLARD und PRITCHETT, 1975 a) sind auf den Untersuchungsstandorten

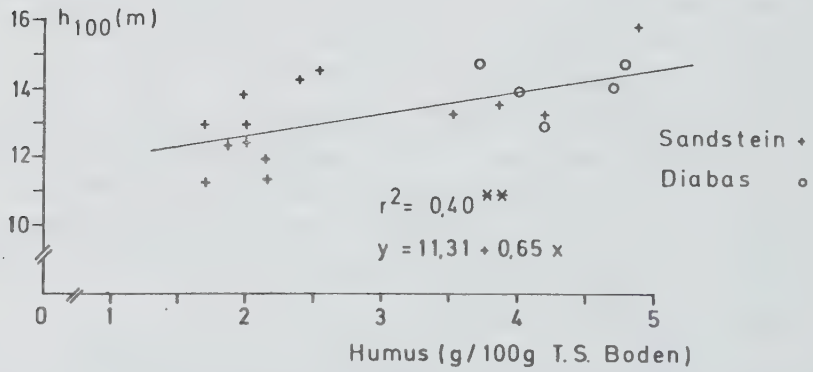

Abb. 32: Beziehung zwischen Humusgehalt im obersten Mineralboden und Baumhöhen

durchweg ausreichende N- und P-Versorgung der Pinus taeda-Bestände gegeben (s. Kap. 6.2.1. und 6.2.2.). Der Stickstoff- und Phosphorhaushalt der südbrasilianischen Untersuchungsstandorte ist demnach offenbar deutlich günstiger als auf Standorten der Küstenebene im Südosten der USA, wo BALLARD und PRITCHETT (1974) in Kiefernaufforstungen die Phosphornachlieferung aus der organischen Bodensubstanz als praktisch einzige Quelle nachwiesen. Anorganisch gebundenes Phosphat ist dort im Oberboden offenbar kaum mehr vorhanden, vielmehr in den Unterboden verlagert und dort als Al- und Fe-Phosphat nur schwer verfügbar. Ein Dominieren von Al- und Fe-Phosphaten in der anorganischen Phase ist natürlich auch

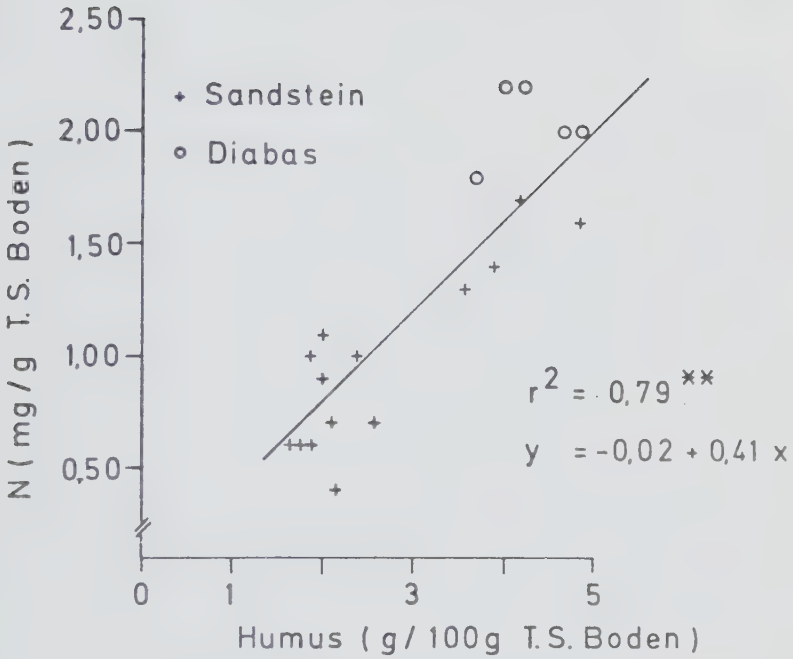

Abb. 33: Beziehung zwischen Humus- und Stickstoffgehalt im oberen Mineralboden in P. taeda-Beständen

für die brasilianischen Standorte anzunehmen. Offenbar ist aber die Nachlieferung durch langsame Mineralisation organisch gebundenen Phosphors auf unseren Untersuchungsstandorten durchweg noch ausreichend für gute P-Versorgung der Aufforstungsbestände in erster Generation.

Positive Beziehungen zwischen Humusgehalt im oberen Mineralboden und Nährelementversorgung lassen sich auf den Untersuchungsstandorten auch für Zink und Kupfer nachweisen (s. Abb. 35 und 36). Zn kann nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1976) in hohem Umfang als Komplex niedermolekularer organischer Säuren vorliegen, die eine wichtige Reserve für pflanzenverfügbares Zn darstellen. Es ist im übrigen bekannt, daß die Pflanze Zn auch als Chelat aufnehmen kann (WILLKINSON, 1972).

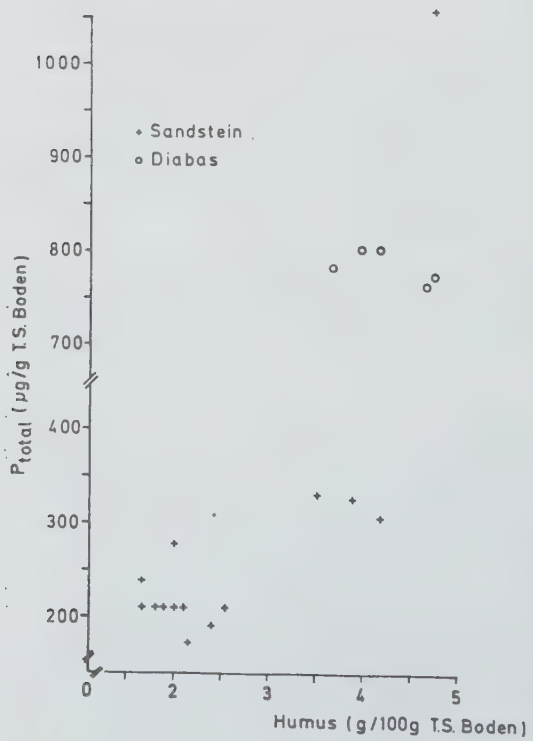

Abb. 34: Zusammenhang zwischen Humus- und Gesamt-Phosphor-Gehalt im oberen Mineralboden

Die Beziehung bei Kupfer ist weniger eng, aber noch signifikant. Hier ist - abgesehen von der stärkeren Streuung der Sandsteinstandorte - wieder eine deutliche Trennung der beiden Bodengruppen entsprechend ihrem Muttergestein zu erkennen. Offenbar begünstigt auf dem insgesamt relativ niedrigen Niveau des Humusgehaltes der untersuchten Böden der humose Anteil positiv die Kupferversorgung der Aufforstungsbestände. Eine starke Festlegung von Kupfer, wie sie in humusreichen Böden von BAUMEISTER und ERNST (1978) oder FINK (1966) nachgewiesen wurde, spielt auf den Untersuchungsstandorten keine Rolle. Überdies ist das enge C/N-Verhältnis der humosen Oberböden dieser Standorte anzumerken (ca. 16).

Wir haben oben angenommen, daß der Humuskörper des obersten Mineralbodens die Verhältnisse vor der Aufforstung widerspiegelt. Die eben besprochenen positiven Beziehungen zwischen Humusgehalt und Versorgung der Aufforstungsbeständen mit Nährelementen bestätigen diese Annahme. Andererseits ist auch zu erwarten, daß bei leicht beweglichen Elementen der in den Aufforstungsbeständen gebildete Auflagehumus bereits den Humus des obersten Mineralbodens beeinflußt hat. Dies ist anzunehmen für Kalium, wo sich keine Anreicherung in der F-Lage zeigte. Auch für Bor ist ein ähnliches Verhalten wahrscheinlich.

Es ist wichtig darauf hinzuweisen, daß der Auflagehumus in den jungen Pinus taeda-Beständen nur eine sehr geringe biologische Aktivität zeigt. Tätigkeit von Mikrofauna, außer Ameisen, ist praktisch nicht zu beobachten; offenbar dominieren Pilze. Wir haben in den untersuchten achtjährigen Beständen ähnliche Verhältnisse, wie sie Fichten-Stangenhölzer in Mitteleuropa im Alter 20 - 40 Jahre zeigen. Die Biomasseproduktion kulminiert in diesem Alter, die hohe Streuproduktion führt zu biologisch inaktivem Auflagehumus. Mikromorphologisch lassen sich die gebildeten L- und F-Lagen dem Typ Moder zurechnen, während unter der früheren Vegetation bzw. der Bodennutzung früherer Perioden Mullhumusformen die Regel waren.

Zweifellos ist die Streu von Pinus taeda schlecht zersetzbar. Dies gilt vor allem bei der hohen jährlichen Streuproduktion in den dicht geschlosse-

nen Aufforstungsbeständen. Die hohe Interzeption der Bestände, die Verminderung der Wärmezufuhr auf den Boden und die uniforme Streuzusammensetzung (keine Bodenvegetation) bewirken die geringe biologische Abbauaktivität. Dies führt in derartigen Pinus taeda-Beständen allgemein auch zu niedrigen pH-Werten. JÖRGENSEN und WELLS (1972) berichten aus den USA über pH-Werte in der F-Lage zwischen 4,3 und 4,8. Die C/N-Verhältnisse sind hoch, nach diesen Autoren zwischen 33 und 42. PRITCHETT (1979) beobachtete - ebenfalls in den südöstlichen USA - eine Erweiterung der C/N-Verhältnisse mit zunehmendem Bestandesalter, d.h. steigender Streuproduktion: Bestände im Alter 5, 11 und 15 Jahren hatten in der F-Lage C/N-Verhältnisse von 16,9; 19,4 und 21,7. In Beständen verwandter Kiefernarten zeigt sich Ähnliches. So berichten HEYWOOD und BARNETTE (1936), zitiert bei PRITCHETT (1979) bei Pinus elliotii und Pinus palustris von C/N-Verhältnissen in der L-Lage zwischen 142 - 70, in der F-Lage zwischen 64 - 38.

Auf unseren Untersuchungsstandorten von Pinus taeda in Südbrasilien hat der Ah-Horizont ein C/N-Verhältnis von 16. In der F- und L-Lage erweitert sich das C/N-Verhältnis auf 48 bzw. 81.

Die Streu von Pinus taeda ist auch relativ arm an Phosphor. Die C/P-Verhältnisse liegen in der L-Lage bei 1160, in der F-Lage bei 875. Im Vergleich zu anderen Standorten sind das sehr hohe Werte, die wiederum für geringe Abbautätigkeit durch Organismen sprechen.

Diese einseitigen Bedingungen in der organischen Auflage dürften zur Bildung organischer Komplexe führen, die bei entsprechender Bodendurchfeuchtung Podsolierungstendenzen auslösen (DUCHAUFOUR, 1959, 1967, 1970; SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1976). Besonders auf den Sandsteinstandorten und vor allem bei den Podzólico Vermelho Amarelo-Böden ist in dieser Phase der Aufforstungen die Gefahr von Oberbodenveränderungen durch Podsolierung gegeben. Dabei begünstigt die grobe Textur dieser Böden eventuelle Verlagerungsvorgänge.

Es bleibt abzuwarten, wie sich die Humusform in höherem Alter der Bestände (Auflichtung, Entwicklung von Bodenvegetation) verändert. Vermutlich

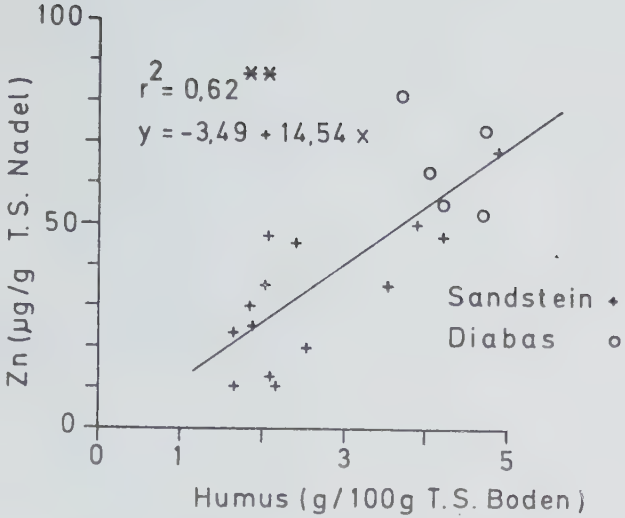

Abb. 35: Beziehung zwischen Humusgehalt im obersten Mineralboden und Zn-Gehalt in den P. taeda Nadeln

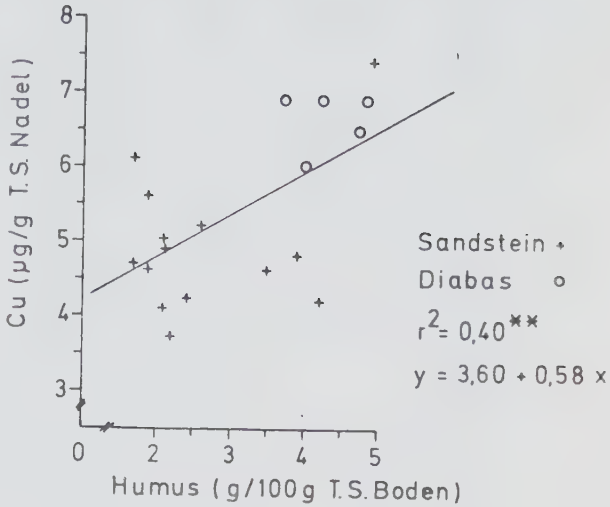

Abb. 36: Beziehung zwischen Humusgehalt im oberen Mineralboden und Cu-Gehalt in den P. taeda Nadeln

wird ein besserer Abbau des Auflagehumus schon nach der zweiten Durchforstung (im Alter von 15 Jahren) einsetzen. Es gibt auch Maßnahmen, mit denen eine Beschleunigung der Zersetzung des organischen Materials zu erreichen ist. Eine Möglichkeit ist kontrolliertes Brennen. Dabei wird der größte Teil der Streulage vernichtet, führt also zu N-Verlusten, andererseits aber infolge der verbleibenden Asche mit hohem Anteil an löslichem K, Mg, Ca und P zu einer intensiveren Mineralisation.

Die Stickstoffverluste des Ökosystems können durch Luftstickstoffbindung der später aufkommenden Bodenvegetation bzw. Sekundärvegetation teilweise ausgeglichen werden. Eine Gefahr besteht im Vorhandensein der Nadelmengen, die in den unteren Ästen der Kiefern hängen. Werden sie vom Bodenfeuer erfaßt, so ist ein Übergreifen auf die Bäume selbst möglich. Hier sind noch Untersuchungen nötig, bevor der forstlichen Praxis konkrete Ratschläge gegeben werden können.

Eine zweite Möglichkeit wäre Kalkung, eventuell verbunden mit Düngungsmaßnahmen. Dies ist jedoch kostspielig und technisch schwierig. Außerdem könnte die Kalkung zu relativ schneller Mineralisierung der angehäuften organischen Substanz führen, was auf durchlässigen Böden gravierende Nährstoffverluste der Ökosysteme verursachen würde. Besonders Stickstoff ist hierbei betroffen. Dies geht aus Untersuchungen von LEAR (1980) in Aufforstungen in den USA hervor.

Nach dem derzeitigen Stand des Wissens sind vermutlich weder Kalkungsmaßnahmen noch kontrolliertes Brennen geeignete Maßnahmen in jungen Aufforstungsbeständen von Pinus taeda. Es wird wichtig sein zu beobachten, inwieweit bei stärkerer Auflichtung der Bestände durch die aufkommende Bodenvegetation eine "natürliche" Veränderung der Humusform durch stärkere Mineralisation zustande kommt. Wichtig wären zweifellos eingehende Untersuchungen über die Nährstoffumsetzungen in derartigen Aufforstungsbeständen, wobei im Gegensatz zu Beständen anderer Gebiete eine Erfassung von Menge und Verweildauer der an den Ästen hängenden Nadelstreu wichtig erscheint. Auch bodenbiologische Untersuchungen sollten vorrangig betrieben werden, um einen Einblick in das Abbaugeschehen der organischen Auflagen zu erhalten.

7. ERGEBNISSE UND DISKUSSION: PINUS ELLIOTTII ENGELM.

Von P. elliottii liegen bisher nur Untersuchungen im Staat Sao Paulo vor (van GOOR, 1965/1966; LA BASTIDE und van GOOR, 1970). Das Hauptanbaugebiet dieser Baumart ist jedoch in den drei südlichen Staaten Paraná Santa Catarina, Rio Grande do Sul (GOLFARI, 1968/1971). Unsere Untersuchungen wurden daher auf diesen Raum konzentriert.

Nach Abb. 1 gehört auch Rio Grande do Sul noch in das Gebiet, in dem P. elliottii aufgrund der ökologischen Gegebenheiten anbauwürdig ist. Die meisten Aufforstungen liegen jedoch in Paraná und Santa Catarina.

Die Untersuchungsbestände wurden entsprechend der flächenmäßigen Verteilung der Aufforstungen ausgewählt. Gleichzeitig wurde eine Verteilung auf die wichtigsten Bodentypen bzw. Ausgangsgesteine angestrebt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Verteilung der untersuchten Standorte.

Untersuchungsbezirk (Nummer)	Gestein	Zahl der Standorte
Passo Fundo (1)	Basalt	3
Sao Francisco do Sul (2)	Rezente Sedimente ("Areias Quartzosas")	3
Tres Barras (3)	Tonschiefer	3
Ponte Alta do Norte (4)	Basalt	15
	Sandstein	2
Irati (5)	Tonschiefer	3
Ponta Grossa (6)	Tonschiefer	2
	Sandstein	1

Untersuchungsbezirk 4 ist mit 17 Probeflächen am stärksten repräsentiert. Hier liegen die größten Anbauflächen von Pinus elliottii und gleichzeitig eine große Zahl von ertragskundlichen Dauerbeobachtungsflächen, die unter der Betreuung der Forstlichen Fakultät in Curitiba stehen (FUPEF, 1977). Die überdurchschnittlich hohe Zahl von Probeflächen in diesem Bezirk beruht also vor allem auf den dort in großem Umfange vorhandenen

ertragskundlichen Daten.

Bezirk 4 gehört zusammen mit Bezirk 2 zu den klimatischen Extremen des Untersuchungsgebietes (s. Tab. 2). Innerhalb der Untersuchungsbezirke sind die Klimabedingungen jedoch sehr einheitlich. Deshalb gibt es kaum Wachstumsunterschiede in diesen Bezirken, die auf klimatische Differenzen zurückzuführen sind. Außerdem ist innerhalb der Untersuchungsbezirke eine gewisse Einheitlichkeit der Bodentypen und Bodennutzungsart vor der Aufforstung zu finden. Im Bezirk 4 überwiegen tiefgründige Basalt-Latosole, die früher Araukarienwald trugen oder "Campo". Das Klima ist relativ kühl. Die Untersuchungsbestände im Gebiet 2 liegen alle auf "Areias Quartzosas", die ein extrem nährstoffarmes Substrat darstellen. Nach dem "Levantamento de Reconhecimento dos Solos do estado de Santa Catarina "(SANTA MARIA, 1973) haben diese Böden nur geringe Vorräte an Ca und Mg; auch P und K weisen nur sehr geringe Werte auf. Trotzdem liegt in diesem Raum einer der bestwüchsigen Standorte (obwohl auf diesem das Bestandesalter nicht 8 Jahre, sondern nur 7 Jahre 10 Monate beträgt). Allerdings ist der Bezirk 2 hinsichtlich des Temperaturangebotes am günstigsten im gesamten Untersuchungsraum.

Die Bezirke 3 und 5 befinden sich auf der gleichen geologischen Formation (Perm-Tonschiefer). Bezirk 1 (Passo Fundo) hat ein ähnliches Großklima, wird jedoch aufgrund seiner extrem südlichen Breite als eigene Standortsgruppe betrachtet. Im Gegensatz zu den im ersten Teil der Arbeit behandelten Beständen von Pinus taeda sind die Aufforstungsflächen von P. elliottii hinsichtlich Samenherkunft, waldbaulicher Behandlung und Bodennutzungsart vor der Aufforstung sehr wahrscheinlich stärker heterogen. In den Bezirken 1, 3 und 5 - mit Ausnahme der Gleye - dominierte landwirtschaftliche Nutzung vor der Aufforstung. Die Bezirke 2, 4 und 6 trugen früher Küstenwald, "Campo" und Mischungen von "Campo" mit Araukarienwald. Die Aufforstungen im Bezirk 4 waren nach mechanischer Bodenvorbereitung (Bulldozer) begründet worden.

Ebenso wie bei P. taeda wurden für P. elliottii einheitlich nur 8-jährige Bestände für die Untersuchungen herangezogen. Geringe Altersabweichun-

gen (von wenigen Monaten) sind allerdings möglich. Alle Pflanzungen haben gleiche Pflanzabstände von 2,0 x 2,0 m.

Die Meßverfahren und das Vorgehen bei der Probenahme ist für die P. elliottii-Bestände das gleiche wie bei den P. taeda-Beständen (s. Kap. 5).

7.1. Makronährelemente

Stellt man die Nährelementgehalte der halbjährigen Nadeln auf den 32 Untersuchungsstandorten in Beziehung zur Wuchsleistung, so ergibt sich für kein Makronährelement eine gesicherte Beziehung. Gleichzeitig wird erkennbar, daß der Versorgungsgrad bei allen Hauptnährelementen über dem Mangelbereich, meist sogar im suboptimalen bis optimalen Bereich liegt. Da auch bei den Mikronährelementen (s. Kap. 7.2.) keine Beziehungen zum Wachstum erkennbar sind, müssen andere Faktoren - vermutlich Klima und die Verhältnisse bei der Bestandesbegründung bzw. vorherige Nutzungsart - zur Differenzierung der Wuchsleistung geführt haben.

Da der Nährelementversorgungsgrad von P. elliottii in Südbrasilien im Vergleich zu anderen Aufforstungsgebieten von Interesse ist, werden die erhaltenen nadelanalytischen Daten im Folgenden unter Zusammenziehung in großklimatisch einheitliche Standortsgruppen bzw. Bodentypen präsentiert. Auf diese Weise läßt sich leichter ein Einblick in die Ernährungssituation der untersuchten Aufforstungsgebiete geben. Außerdem werden Extremstandorte diskutiert.

Aus Tab. 18 ist ersichtlich, daß in 2 Untersuchungsbezirken das schlechteste Wachstum vorliegt. Es handelt sich um Passo Fundo (1) und Irati (5). Im Bezirk 1 liegen die untersuchten Standorte auf Basalt-Ranker, sehr flachgründigen Böden (nur 0,3 m tief entwickelt) am Oberhang. Dies sind offenbar stark erodierte Standorte, auf denen auch die frühere Ackernutzung problematisch war. Nach mündlichen Mitteilungen stieß auf diesen Standorten die Aufforstung auf große Schwierigkeiten; mehrfach waren Ausfälle der Pflanzungen durch Neuanpflanzungen zu überwinden. Die Ent-

Tab. 18: Makronährelementgehalte in halbjährigen Nadeln und Höhenwachstum von P. elliottii. Mittelwerte für klimatische Standortsgruppen und Bodentypen

Klima (Jahresmitteltemp. °C	Bezirk	Bodentyp	mg/g T.S.					h_{100}(m)	Probenzahl
			N	P	K	Ca	Mg		
15, 3	4	Basalt-Latosol	14, 2	1, 52	7, 41	2, 41	1, 33	11, 30	15
		Sandstein-Latosol	12, 6	1, 55	6. 68	2, 10	1, 33	10, 90	2
16, 5-17, 7	3, 5, 6	Sandstein-Latosol	15, 7	1, 37	5, 23	1, 57	1, 35	13, 90	1
		Tonschiefer-Ranker	15, 8	1, 37	8, 49	1, 37	1, 15	13, 00	2
		"Podzólico Vermelho Amarelo"	13, 0	1, 37	7, 97	2, 16	1, 27	12, 20	2
		Tonschiefer-Latosol	13, 0	1, 36	7, 25	1, 35	1, 17	10, 00	1
		Gley (dräniert)	13, 0	1, 26	6, 04	1, 86	1, 15	11, 60	2
		Gley	12, 1	0, 82	5, 90	0, 45	0, 58	8, 50	1
17, 5		Basalt-Ranker	13, 0	1, 81	10, 73	2, 43	1, 50	9, 60	1
		Basalt Latosol	14, 1	1, 65	11, 02	1, 97	1, 32	10, 50	2
20, 6		"Areias Quartsosas"	14, 7	1, 31	4, 33	3, 11	1, 52	13, 30	3

wicklung des Wurzelwerks der jungen Bäume war zweifellos sehr erschwert. Dies führt auch nach Beobachtungen von FOIL und RALSTON (1965) in den USA zu sehr geringem Höhenwachstum in den ersten Jahren bei gleichzeitiger starker Konkurrenz durch die Bodenvegetation. Da - wie schon angedeutet - die Versorgung mit Nährelementen mindestens ausreichend ist, wäre eine stärkere Zunahme des Höhenwachstums in den Folgejahren anzunehmen. Dies könnte sich nach einigen Jahren in einer Angleichung der Wuchsleistung dieser Bestände an solche auf besserwüchsigen Standorten zeigen. Mangelnde Niederschläge dürften nicht als Ursache für das geringere Wachstum in Frage kommen (s. Tab. 2); außerdem zeigte sich in anderen Untersuchungen, daß P. elliottii bevorzugt auf leichten, sandigen Böden mit sehr gutem Wachstum glänzt.

Im Untersuchungsbezirk 5 (Irati) sind ungünstige physikalische Bodeneigenschaften offenbar verantwortlich für die geringe Wuchsleistung. Es handelt sich um einen Gley-Standort, auf dem die Feinwurzeln intensiv nur etwa 1 dm tief in den Mineralboden eindringen. Bei spätestens 4 dm Tiefe ist der Grundwasserspiegel meist schon erreicht. Auf solchen Standorten ist erst nach Dränage ein besseres Wachstum von P. elliottii möglich. Dies bestätigen auch die Ergebnisse von BAUR (1959) aus Australien. Wichtig scheint zu sein, daß der Grundwasserspiegel nicht höher als 4 - 5 dm unter Flur ansteigt und keine größeren Schwankungen aufweist (PRITCHETT und SMITH, 1968). Nach den genannten Autoren ist die Nährstoffversorgung auf den dränierten Gleyen infolge erhöhter Mineralisation der organischen Bodensubstanz und Nutzung eines tieferen Wurzelraumes günstiger.

Da in Südbrasilien Gley-Standorte in ausgedehnten Niederungen auf großer Fläche vorkommen, dieses Land sehr billig ist und anderweitige Nutzung kaum möglich scheint, empfehlen sich Melliorationsmaßnahmen (Dränage) auf solchen Standorten mit dem Ziel von Aufforstungen.

Die Mittelwerte der Nadelanalysen in Tab. 18 lassen für Stickstoff eine höchstens suboptimale Versorgung erkennen. Nach ZÖTTL und TSCHINKEL (1971) liegt nämlich der Bereich guter N-Versorgung bei 18 - 20 mg/g T. S. Solche Werte werden auf den südbrasilianischen Standorten von dieser

Baumart nicht erreicht. Wie Abb. 37 zeigt, ergibt sich für die Standortsgruppen-Mittwlerte sogar eine klare positive Beziehung zwischen N-Gehalt und Wuchsleistung. Es ist jedoch fraglich, ob sich hierin tatsächlich eine wachstumsbegrenzende Abhängigkeit von der Stickstoffversorgung widerspiegelt. Wachstumsbegrenzender Stickstoffmangel liegt eindeutig erst bei wesentlich niedrigeren N-Gehalten in den Nadeln vor (10 - 12 mg/g T. S. Nadeln, nach PRITCHETT, 1979). So berichten PRITCHETT und LLEWELLYN (1966) aus dem natürlichen Verbreitungsgebiet von P. elliottii von 15-jährigen Bäumen mit 16, 3 m Oberhöhe und nur 8, 1 mg/g N in den halbjährigen Nadeln. Sehr hohe N-Gehalte (im Bereich, der bei anderen Kiefernarten als optimal gilt) sind nur aus Kulturversuchen bzw. nach Düngungsmaßnahmen bekannt. DUMBROFF und MICHELL (1967) erhielten unter solchen Bedingungen N-Gehalte um 20 mg/g T. S.

Insgesamt läßt sich somit für das wichtigste Makroelement Stickstoff sagen, daß die südbrasilianischen Aufforstungsstandorte für P. elliottii offenbar weithin ausreichende Mengen anbieten. Es ist festzuhalten, daß schon BLUM und HILDEBRAND (1977) im Untersuchungsbezirk Irati (5) relativ niedrige N-Gehalte beobachtet hatten. P. elliottii ist demnach als anspruchslose Baumart zweifellos für Aufforstungen in Südbrasilien sehr geeignet.

Auch bei Phosphor ist die Situation in den südbrasilianischen P. elliottii-Beständen deutlich von der im natürlichen Verbreitungsgebiet der Südost-Staaten der USA verschieden. Auf den dortigen, extrem P-armen Sandböden spielt die Phosphorversorgung die entscheidende Rolle für die Wuchsleistung. In Südbrasilien ist die P-Versorgung (mit Ausnahme der Gley-Standorte) durchweg als optimal zu bezeichnen. Besonders die Basalt-Standorte zeigen sehr hohe Werte von 1, 5 - 1, 8 mg/g (s. Tab. 18). Demgegenüber ist die P-Versorgung im Untersuchungsbezirk 2 bei bester Wuchsleistung eigentlich nur noch als ausreichend zu bezeichnen (1, 3 mg/g T. S. Phosphor in den halbjährigen Nadeln).

Die günstige klimatische Situation erlaubt auf diesen Standorten bei nur mäßigem P-Angebot aus dem Boden offenbar die sehr guten Wuchsleistungen. Die Böden dieses Bezirks, "Areias Quartzosas", weisen nur geringe

P-Gehalte auf (s. Tab. 20) und ähneln den Lowland-Böden der südöstlichen USA. Demgegenüber fallen die Böden von Bezirk 6 (Ponta Grossa) durch hohe P-Gehalte auf. Die Standsortsgruppe Ponta Grossa ist repräsentativ für den 2. Planalto Südbrasiliens.

Es wäre denkbar, daß in späteren Aufforstungsgenerationen aufgrund des laufenden P-Entzuges auf den "Areias Quartzosas" Schwierigkeiten in der Phosphorversorgung auftreten. Auch die Bodendynamik dieser Standorte begünstigt eine Verschlechterung der P-Versorgung. Es handelt sich um Böden mit Podsolierungstendenz bei hohem Eisen- und Aluminium-Gehalt, wodurch eine stärkere Festlegung von Phosphaten in nicht mehr pflanzenverfügbarer Form erfolgen kann. Vertiefte Untersuchungen über die P-Dynamik dieser Standorte und anderer "Podsol-Hydromórfico"-Böden im Staat Santa Catarina sind erforderlich, um eventuelle spätere Fehlschläge

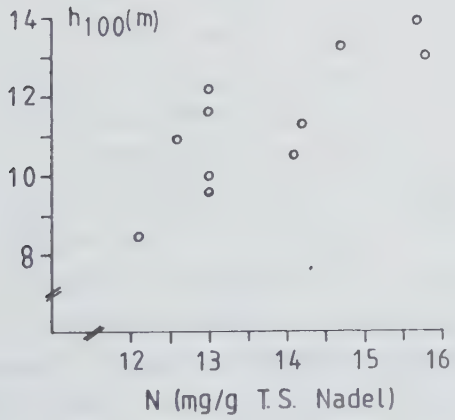

Abb. 37: Zusammenhang zwischen N-Gehalt in P. elliottii-Nadeln und Höhenwachstum

bei Aufforstungen zu vermeiden.

Auf den phosphorarmen Böden der USA (und in Aufforstungsgebieten von Australien) ist die P-Düngung eine wichtige Maßnahme zur Erzielung befriedigender Wuchsleistung bei P. elliottii (BALLARD und PRITCHETT, 1974). In den dort untersuchten Böden liegen die P-Reserven überwiegend in organischer Bindung vor. Die Gesamtgehalte im oberen Mineralboden betragen bei "Groundwater-Podzols" 70 - 120 ug/g T. S., in Gley-Böden wurden 50 - 300 ug/g festgestellt (PRITCHETT und SMITH, 1968). Extrem niedrige Werte mit 21 ug/g wurden von PRITCHETT und SWINFORD (1961) gemessen. Solche Extremwerte sind zweifellos sowohl durch geringe lithogen bedingte P-Gehalte und Verlagerungsprozesse zustande gekommen.

Es verdient somit festgehalten zu werden, daß die Phosphoranlieferung auf den südbrasilianischen Pinus elliottii-Standorten trotz intensiver Fe- und Al-Dynamik bei Latosolen praktisch durchweg ausreichend bis optimal ist.

Auch die Versorgung mit K, Mg und Ca ist allgemein gut (Tab. 18). Besonders hoch sind die K-Gehalte auf Basalt, wo aber auch Ca und Mg ein hohes Niveau erreichen. Auch auf Tonschiefer-Ranker im Bezirk 6 ist der Kaliumgehalt sehr hoch, offensichtlich lithogen bedingt (s. Tab. 20). Diese hohen K-Gehalte der devonischen Tonschiefer im Gebiet Ponta Grossa wurden schon von SANTOS FILHO (1977) unterstrichen.

Im Gegensatz dazu stehen die relativ geringen K-Gehalte auf den "Areias Quartzosas" von São Francisco do Sul (Tab. 18). Sie liegen bereits nahe dem kritischen Bereich, der nach PRITCHETT (1979) bei 2,5 - 3,0 mg/g T.S. K in halbjährigen Nadeln beginnt. Die hohe Wuchsleistung der Bestände im klimatisch sehr begünstigten Bezirk São Francisco do Sul werden - ähnlich wie bei P - auch mit nur ziemlich niedrigen K-Gehalten erreicht. Die Ca- und Mg-Versorgung ist auf diesen Standorten andererseits aber sehr gut.

Zusammenfassend läßt sich somit sagen, daß auch die Versorgung mit Kalium, Calcium und Magnesium auf den untersuchten Standorten bei

Pinus elliottii überwiegend gut ist und offensichtlich keine Wachstumsdifferenzierung bewirkt.

7.2. Mikronährelemente

Bei Fe, Mn und Cu zeigt sich - ebenso wie früher bei Pinus taeda beschrieben - eine durchweg sehr gute Versorgung (Tab. 19). Die lithogene Differenzierung ist offenkundig. Höchste Werte findet man auf den Basalt-Standorten. Hier liegt offenbar Luxuskonsum vor.

Interessant ist, daß bei Kupfer die besten Wuchsleistungen mit den niedrigsten Kupfergehalten erzielt werden. Diese liegen um 5 - 6 ug/g. Bezeichnenderweise fällt hierunter wieder die Standortsgruppe Sao Francisco do Sul mit der höchsten Jahresmitteltemperatur der untersuchten Standorte.

Bei Zink liegen einige Bestände in der Nähe des kritischen Bereichs, der von PRITCHETT (1979) zwischen 20 - 50 ug/g T.S. angegeben wird. Da sich aber keine Beziehungen zum Wachstum erkennen lassen, ist vermutlich - zumindest unter den Bedingungen von Südbrasilien - diese Mangelbereichsgrenze zu hoch angesetzt. Diese Vermutung liegt auch deshalb nahe, weil andere verwandte Kiefernarten erst bei Zn-Gehalten unter 20 ug/g Mangelerscheinungen zeigen. Sehr wahrscheinlich liegt Zinkmangel erst bei Werten unter 15 ug/g vor, denn van GOOR beobachtete bei einer Variation der Zn-Gehalte zwischen 15 - 75 ug/g T.S. keine Beziehungen zur Wuchsleistung.

Auch Bor liegt bei keiner Standortsgruppe im Mangel (Grenze nach PRITCHETT, 1979 bei 4 - 8 ug/g T.S.). Van GOOR konnte bei Borgehalten von 4,3 ug/g T.S. Bormangel bei 5-jähriger P. elliottii erkennen. Auf unseren Standorten ist, wie gesagt, trotz großer Variationsbreite der Werte keinerlei Beziehung zur Wuchsleistung erkennbar.

Insgesamt läßt sich somit für die Mikroelemente - vielleicht mit Ausnahme von Zink - durchwegs eine ausreichende bis gute Versorgung erkennen.

Tab. 19: Mikronährelementgehalte in halbjährigen Nadeln und Höhenwachstum von P. elliottii. Mittelwerte für klimatische Standortsgruppen und Bodentypen

Klima (Jahresmittel-temp. °C	Bezirk	Bodentyp	ug/g T.S.						h_{100}(m)	Proben-zahl
			Fe	Mn	Zn	Cu	B	Al		
15, 3	4	Basalt-Latosol	99	430	64	9, 7	28	605	11, 30	15
		Sandstein-Latosol	68	402	40	8, 5	24	563	10, 90	2
16, 5-17, 7	3, 5, 6	Sandstein-Latosol	65	413	45	6, 6	22	750	13, 90	1
		Tonschiefer-Ranker	74	258	38	6, 7	17	775	13, 00	2
		"Podzólico Vermelho Amarelo"	52	230	54	8, 3	20	500	12, 20	2
		Tonschiefer-Latosol	58	355	45	10, 0	17	575	10, 00	1
		Gley (dräniert)	60	146	20	6, 2	12	438	11, 60	2
		Gley	56	242	34	6, 8	15	607	8, 50	1
17, 5	1	Basalt-Ranker	63	311	52	11, 0	19	612	9, 60	1
		Basalt-Latosol	64	385	49	13, 0	25	575	10, 50	2
20, 6	2	"Areias Quartzosas"	93	237	54	5, 0	25	875	13, 30	3

Tab. 20: Vergleich der beiden bestwüchsigen Bezirke nach den Gesamtelementgehalten im Mineralboden (0 - 20 cm)

Bezirk	mg/g T.S. Boden							ug/g T.S. Boden			h_{100} (m)
	N	P	K	Ca	Mg	Al	Fe	Mn	Zn	Cu	
Sao Francisco do Sul (2)	1,00 0,70-0,99	0,14 0,10-0,17	0,94 0,43-1,35	0,41 0,12-0,60	0,31 0,15-0,54	10 5 -17	9 5-19	105 55-200	17 10-30	15 10-25	13,30
Ponta Grossa (6)	1,90 1,50-2,40	0,75 0,50-0,99	8,57 1,72-14,00	1,13 1,00-1,20	2,18 1,20-2,90	131 121-138	59 47-63	143 110-180	48 30-65	37 30-40	13,30

7.3. Aluminium

Die Gehalte dieses Elements in den Nadeln wurden untersucht, weil es bei manchen Pflanzen in höheren Konzentrationen toxisch wirken kann. Aufgrund der Bodendynamik ist damit zu rechnen, daß eine hohe Al-Verfügbarkeit auf den meisten der Standortsgruppen gegeben ist.

Tabelle 19 läßt die zwischen 438 und 875 ug/g liegenden Al-Gehalte in den halbjährigen Nadeln erkennen. Es bestehen keine Beziehungen zwischen Al-Gehalt und Wuchsleistung; die Bestände in den beiden sehr gut wüchsigen Bezirken 2 und 6 haben die höchsten Al-Gehalte. Negative Auswirkungen des Aluminiums auf das Wachstum sind somit mit Sicherheit auszuschließen.

Die gemessenen Gehalte sind im Vergleich zu den bei anderen Baumarten festgestellten sehr hoch; nach der Einstufung von CHENERY und SPORNE (1975) wäre P. elliottii damit aber noch nicht zu den "Aluminium-Pflanzen" zu zählen, für die Werte über 1000 ug/g Al erforderlich sind. Andererseits haben HUMPHRIES und TRUMAN (1964) in Australien Al-Gehalte bis 1251 ug/g T.S. gefunden. Auf Böden mit geringer Al-Mobilisierung sinken die Al-Gehalte in den Nadeln von P. elliottii auf sehr niedrige Werte (z.B. 50 ug/g) ab.

Aus den Ergebnissen lassen sich für P. elliottii zwar relativ hohe, gegenüber P. taeda aber deutlich niedrigere Al-Werte ablesen. Auf jeden Fall ist auch Pinus elliottii gegenüber hohem Al-Angebot absolut tolerant.

7.4. Auflagehumus

Ebenso wie in den Beständen von P. taeda wurden auch in den P. elliottii-Aufforstungen die L- und F-Lagen analysiert. Sie werden praktisch ausschließlich von den Kiefernnadeln gebildet, da eine Begleitvegetation fehlt. Infolge der sehr langsamen Zersetzung haben sich organische Auflagen gebildet, die noch kaum im Kontakt mit dem Ah-Horizont stehen. L- und F-Lage spiegeln somit die Verhältnisse der Aufforstungen wider und sind

nur indirekt vom Bodenzustand vor der Begründung der Pflanzungen beeinflußt. Der besseren Übersichtlichkeit halber sind die Daten wiederum für die einzelnen klimatischen Standortsgruppen zusammengefaßt.

Aus Tabelle 21 und 23 fallen als erstes die hohen C:N-Quotienten auf (L-Lage: 70 - 106; F-Lage: 42 - 64). Die niedrigsten Quotienten beobachtet man im wärmsten Bezirk 2. Hier ist offenbar die mikrobiologische Aktivität deutlich höher als in den anderen Bezirken. Trotzdem ist auch hier die Zersetzung insgesamt sehr schwach, ähnlich wie bei P. taeda. Aufgrund des höheren Harzgehaltes von P. elliottii ist hier sogar mit noch langsamerem Abbau zu rechnen.

Beim Vergleich der Makronährelementgehalte in den halbjährigen Nadeln und den organischen Auflagen (Tab. 18, 21 und 23) wird - ähnlich wie bei P. taeda - besonders die Calcium-Anreicherung deutlich.

Bei N und P bestehen große Differenzen zwischen den Gehalten der halbjährigen Nadeln und der L-Lage. Vermutlich kommt es auch bei P. elliottii zu einem starken Rückzug von N- und P-Verbindungen vor dem Abfallen der Nadeln. Gegenüber der L-Lage hat die F-Lage wiederum deutlich höhere Gehalte an N und P. Hier handelt es sich um indirekte Anreicherung infolge mikrobiellen Abbaus von organischem Material, was sich auch in der deutlichen Verengung des C:N-Quotienten widerspiegelt. Bei den Kalium-Gehalten wird der Einfluß der Auswaschung deutlich. Die Gehalte in der L-Lage betragen nur ca. 1/10 derjenigen in den halbjährigen Nadeln; die Werte der F-Lage liegen weiterhin unter denen der Streulage. Nur die Mg-Gehalte differieren wenig.

Bei Mikronährelementen (Tab. 19, 22 und 24) beobachtet man für Fe und Mn teilweise enorme Zunahmen bei Übergang von der firschen Nadel in die L- und F-Lage. Der starke Sprung zwischen L- und F-Lage ist durch indirekte Anreicherung infolge Abbaus organischen Materials nicht mehr zu erklären; hier dürfte es sich um "Verunreinigung" aus dem Mineralboden handeln. Gleiches dürfte für Zn im Untersuchungsbezirk 1 gelten. Erstaunlich hoch ist auch die Zunahme der Gehalte bei Al. Die hohen Werte der F-Lage dürften ebenfalls mit Einmischung aus dem Mineralboden zu er-

Tab. 21: Makronährelementgehalte in der L-Lage von P. elliottii-Beständen. Mittelwerte der klimatischen Standortsgruppen

Klima Jahresmittel-temperatur °C	Bezirk	mg/g T. S.						Proben-zahl
		N	P	K	Ca	Mg	C/N	
15, 3	4	5, 80	0, 56	0, 59	6, 12	1, 00	94	17
16, 5-17, 7	3, 5, 6	5, 60	0, 29	0, 71	6, 02	0, 95	98	9
17, 5	1	4, 80	0, 38	1, 62	9, 00	1, 17	106	3
20, 6	2	7, 40	0, 45	1, 27	7, 35	1, 58	70	3

Tab. 22: Mikronährelementgehalte in der L-Lage von P. elliottii-Beständen. Mittelwerte der klimatischen Standortsgruppen

Klima (Jahresmittel-temperatur °C	Bezirk	ug/g T.S.						Proben-zahl
		Fe	Mn	Zn	Cu	B	Al	
15,3	4	1003	882	23	6,3	4,0	1008	17
16,5-17,7	3,5,6	354	689	19	8,3	6,4	1253	9
17,5	1	346	975	59	9,0	11,5	1297	3
20,6	2	269	390	37	4,7	6,7	1223	3

klären sein. Ob die hohen Werte der L-Lage vor allem durch die Gehalte der abfallenden Nadeln bewirkt werden, ließe sich nur sagen, wenn auch Analysendaten der mehrjährigen Nadeln vorlägen. Es ist anzunehmen, daß Al sich mit zunehmendem Nadelalter anreichert.

Der Vergleich der Nährelementgehalte in den halbjährigen Nadeln, L- und F-Lage ergibt insgesamt ein ähnliches Bild wie oben für die P. taeda-Bestände gezeigt wurde. An dieser Stelle ist nochmals darauf hinzuweisen, daß der Zersetzungsgrad der F-Lage sehr gering ist. Sie besteht im wesentlichen aus Nadelbruchstücken und enthält noch kaum Feinhumus (s. Kap. 6).

7.5. Zusammenfassende Beurteilung der Nährelementversorgung

Pinus elliottii gilt allgemein als Baumart mit geringen Ansprüchen an die Nährelementversorgung (s. Kap. 3.2.). Diese Ansprüche werden im Untersuchungsgebiet Südbrasiliens praktisch für alle Nährelemente gut erfüllt - mit Ausnahme von N in manchen Bezirken. Nur die Versorgung mit Stickstoff ist demnach in Südbrasilien auf einigen Standorten wachstumsbegrenzend niedrig. Dies dürfte mit der Bodennutzung bzw. natürlichen Vegetation vor der Begründung der Aufforstungen in Zusammenhang stehen. Vermutlich sind auf diese Weise verschieden hohe N-Vorräte bzw. Mineralisationsraten bewirkt worden.

Im Gebiet von Sao Paulo, das van GOOR (1965) und LA BASTIDE und van GOOR (1970) näher untersuchten, liegen die Verhältnisse anders; dort macht sich wachstumsbegrenzender Mangel an Mg und besonders an B bemerkbar.

Angesichts der hohen P-Festlegung in den meisten der untersuchten Böden ist die gute Versorgung mit diesem Nährelement in den P. elliottii-Beständen sehr bemerkenswert. Die P-Versorgung stellt somit in Südbrasilien bei P. elliottii keinerlei Problem dar. Im Gegensatz hierzu stehen die Verhältnisse in den Südoststaaten der USA, dem natürlichen Verbreitungsgebiet

Tab. 23: Makronährelementgehalte in der F-Lage von P. elliottii-Beständen. Mittelwerte der klimatischen Standortsgruppen

Klima (Jahresmitteltemperatur °C)	Bezirk	mg/g T. S.					C/N	Probenzahl
		N	P	K	Ca	Mg		
15,3	4	8,30	0,64	0,72	6,64	1,00	64	17
16,5-17,7	3,5,6	8,70	0,53	0,64	6,34	0,75	62	9
17,5	1	7,90	0,65	1,07	11,65	2,72	63	3
20,6	2	11,30	1,11	0,79	5,18	0,89	42	3

Tab. 24: Mikronährelementgehalte in der F-Lage von P. elliottii-Beständen. Mittelwerte der klimatischen Standortsgruppen

Klima (Jahresmittel-temperatur °C	Bezirk	ug/g T. S.					
		Fe	Mn	Zn	Cu	B	Al
15,3	4	2322	964	28	6,4	6,0	4240
16,5-17,7	3,5,6	1773	845	23	9,9	6,2	3794
17,5	1	2945	1165	60	8,8	8,7	4185
20,6	2	1059	711	38	5,0	6,0	2210

dieser Baumart. Dort ist auf den meisten Standorten gutes Wachstum nur nach Verbesserung der P-Versorgung durch Düngung zu erreichen. Ungedüngte Bestände weisen dort durchschnittliche jährliche Höhenwuchsleistungen von ca. 0,95 m auf (PRITCHETT und SWINSFORD, 1961). Ähnliche Höhenzuwächse werden auch im Raum Sao Paulo (Santa Rita do Passa Quadro) auf Böden mit durchschnittlicher Fruchtbarkeit festgestellt (0,85 m nach GURGEL FILHO, 1956). In unserem südbrasilianischen Untersuchungsgebiet liegen die vergleichbaren Höhenzuwächse zwischen 1,2 - 1,7 m pro Jahr, sind also deutlich überlegen. Vermutlich spielt hierfür auch die klimatische Situation eine wichtige Rolle (GOLFARI, 1968/1971). Im Gebiet Südbrasiliens sind die ausreichend hohen Niederschläge ziemlich regelmäßig über das gesamte Jahr verteilt; die Winter haben durchweg milde Temperaturen. Es gibt daher keine ausgesprochene Ruheperiode für das Wachstum von P. elliottii (BENGSTON et al., 1967; PRITCHETT und SMITH, 1968; SQUILLACE, 1966; van GOOR, 1965/1966).

Hervorzuheben ist die allgemein gute Versorgung mit Mikronährelementen. Höchstens bei Zink ist Vorsicht am Platze, wenngleich hier noch eingehendere Untersuchungen erforderlich sind. Auf durchschnittlichen Standorten in Südbrasilien ist für P. elliottii offenbar auch die Versorgung mit Bor gesichert - im Gegensatz zu Standorten im Raum Sao Paulo. Es ist wichtig darauf hinzuweisen, daß unsere Aussagen nur für die Verhältnisse in jungen Erstaufforstungen gelten. Bei wiederholtem Anbau und entsprechend hohem Nährstoffentzug könnten sich die Verhältnisse auf Standorten mit niedrigen Nährstoffvorräten rasch verschlechtern. Dies gilt insbesondere für die "Areias Quartzosas" und auch für dränierte Gley-Standorte. Gerade auf diesen Standorten könnte sich auch Mikronährelementmangel (Zn, B) einstellen. Es wird von großer Bedeutung sein, weitere Untersuchungen für die Zukunft vorzusehen.

Für die gute Versorgung mit N und P in künftigen wiederholten Aufforstungen wird die biologische Aktivität wichtig sein. Das in der organischen Auflage vorhandene Kapital muß möglichst vollständig in den Nährstoffkreislauf einbezogen werden. Sonst könnten bei höheren fortlaufenden

Entzügen an N und P angesichts geringer Vorräte im Mineralboden (SANTA MARIA, 1973) die Anlieferungsraten zu gering werden. In diesem Zusammenhang sind die Feststellungen von WOOLDRIDGE (1968) und PRITCHETT (1979) über die Bedeutung der Einbeziehung von L- und F-Lage in das "recycling" der Nährelemente zu unterstreichen. Waldbautechnische Maßnahmen, wie "controlled burning", die zu Stickstoffverlusten aus dem Ökosystem führen, erscheinen daher aus der Sicht der Mineralstoffversorgung problematisch. Für Kalium gilt teilweise ähnliches wie oben gesagt. Hier wäre auf die Gefahr der Auswaschung besonders auf Böden mit geringem Tongehalt bzw. wenig sorptionskräftigen Tonmineralen hinzuweisen.

Anzustreben sind alle Maßnahmen, die eine raschere Zersetzung der in den ersten Jahren der Aufforstung gebildeten organischen Auflage bewirken. In diesem Zusammenhang sind Untersuchungen über die Rolle und Entwicklung der Bodenkleinfauna und mikrobiologische Testverfahren wichtig.

Von den Standorten her ist interessant, daß die dränierten hydromorphen Böden offenbar gute Möglichkeiten für die Aufforstung mit P. elliottii bieten. Hier lassen unsere Untersuchungsergebnisse praktisch bedeutsame Ansatzpunkte für weitere Aufforstungsvorhaben erkennen. Im übrigen bevorzugt P. elliottii offenbar leichtere, sandige Böden (LINNARTZ, 1963; ZAHNER, 1958). Eine Ausdehnung von Aufforstungen auf solche Standorte in Südbrasilien ist allerdings erst dann zu empfehlen, wenn Untersuchungen über die Nährelementvorräte und -verfügbarkeit auf solchen Standorten vorliegen. Insgesamt läßt sich aber zweifellos schon jetzt erkennen, daß P. elliottii auch in Zukunft eine außerordentlich wichtige Baumart für Aufforstungen in Südbrasilien sein wird und im allgemeinen gute Wuchsleistungen zu erwarten sind.

8. VERGLEICH PINUS TAEDA - PINUS ELLIOTTII

8.1. Wuchsleistung

Ein Vergleich der beiden Baumarten ist nur bedingt möglich, da es kaum Aufforstungsbestände beider Baumarten auf ähnlichem Standort bzw. in unmittelbarer Nähe voneinander gibt. Aufgrund der geographisch verschiedenen Lage der Anbauschwerpunkte mußten die geschilderten Untersuchungen in verschiedenen Räumen durchgeführt werden. Wie schon im Kapitel 5 beschrieben, liegen alle Untersuchungsstandorte von Pinus taeda in einem einzigen Untersuchungsbezirk mit großer klimatischer Einheitlichkeit mit verschiedenen Bodentypen auf zwei Grundgesteinsgruppen (Diabas und Sandstein).

Die Bestände von Pinus elliottii verteilen sich über einen wesentlich größeren geographischen Raum mit hoher Variation der Standortsfaktoren: Unterschiede in der Höhenlage von mehr als 1000 m; entsprechende Differenzierung der Temperaturen (Jahresmitteltemperatur zwischen 15 - 20° C); sehr verschiedene Ausgangsgesteine mit starker Differenzierung von Bodenform und Wasserhaushalt. Außerdem besteht Grund zur Annahme, daß die Samenherkünfte bei Pinus elliottii heterogen waren gegenüber größerer Einheitlichkeit bei Pinus taeda. Auch die Behandlung in den Pflanzschulen, das Verfahren bei der Pflanzung und die Vornutzung der Aufforstungsflächen waren bei Pinus elliottii sicherlich nicht so einheitlich wie bei Pinus taeda.

Stets vergleichbar war jedoch das Alter der untersuchten Bestände, nämlich jeweils 8 Jahre. Festzuhalten ist schließlich, daß alle untersuchten Bestände innerhalb des von GOLFARI (1968/1971) als für Anbauten von P. taeda und P. elliottii geeigneten ökologischen Areals liegen.

Vergleicht man Höhe und Variationsbreite der Wuchsleistung beider Baumarten, so erkennt man bei Pinus taeda eine etwas stärkere Spreitung der Werte und etwas bessere Wuchsleistung.[+)] Aus diesen Daten ist natürlich

---

[+)] Ohne Berücksichtigung des Gley-Standorts von P. elliottii

nicht zu schließen, daß die Wuchsleistung beider Baumarten unbedingt ähnlich wäre. Klar läßt sich erkennen, daß beide Baumarten auf verschiedenen Standorten ihre besten Wuchsleistungen erzielen. Bei Pinus taeda ist dies vor allem auf den Diabas-Standorten der Fall sowie einem Sandstein-Latosol. P. elliottii erreicht auf Basalt nicht das beste Wachstum sondern auf Sandstein-Latosol und den "Areias Quartzosas". Sie ist also offenbar auf leichteren Böden zu höherer Wuchsleistung fähig. Allerdings ist zu betonen, daß die Klimabegünstigung der Standorte mit den "Areias Quartzosas" ebenfalls ein wichtiger Faktor ist (20,6 °C Jahresmitteltemperatur!). Ein gutes Wachstum von P. elliottii auf leichten Böden ist auch aus den USA beschrieben (LINNARZ, 1963).

Flachgründige Böden sind für beide Baumarten kein Hindernis für ausreichendes Wachstum. Dies zeigen die untersuchten Bestände von P. elliottii in Ponta grossa auf Tonschiefer-Ranker mit nur 0,4 dm Bodenmächtigkeit oder die Bestände von Pinus taeda auf Diabas-Ranker mit noch geringerer Bodentiefe. Derartige Befunde decken sich mit Beobachtungen von GOLFARI (1971). Nur auf stark erodierten Böden (offenbar geringe Stickstoffvorräte) geht die Wuchsleistung deutlich zurück. Insgesamt lassen sich somit gewisse Hinweise auf eine Beeinflussung des Wachstums beider Baumarten durch die Körnung und andere physikalische Bodeneigenschaften erkennen, die allerdings noch genauer untersucht werden müßten.

Ein Vergleich des Wachstums von Baumarten lediglich aufgrund von Höhenmessungen in einem gleichen Alter ist natürlich als Aussage für das Wachstumspotential unzureichend. Dies gilt umso mehr, als ertragskundliche Untersuchungen im natürlichen Verbreitungsgebiet ein verschiedenes Kulminationsalter des Wachstums ergaben: P. elliottii 25 Jahre, P. taeda 30 - 35 Jahre (GURGEL FILHO, 1965/1966).

Aus den bisher vorliegenden ertragskundlichen Daten aus Südbrasilien läßt sich eine allgemein höhere Wuchsleistung vonPinus taeda gegenüber Pinus elliottii ablesen. Aus Zuwachstabellen für beide Kiefernarten im Untersuchungsbezirk 4 (FUPEF, 1977) ergeben sich für jeweils 8-jährige Aufforstungen folgende Vergleichsdaten: P. taeda - Höhe 13,2 m; jährlicher

Zuwachs 34 m^3/ha. Pinus elliottii - Höhe 13,0 m; jährlicher Zuwachs 24 m^3/ha. Nach diesen Daten fällt die Überlegenheit von Pinus taeda im Festmeterzuwachs noch deutlicher aus als im Höhenwachstum. Leider macht die zitierte Arbeit keine Angaben über Boden und Standort.

Bei einer vergleichenden Betrachtung des Wachstums der untersuchten Baumarten ist schließlich auch darauf hinzuweisen, daß der jährliche Wachstumsrhythmus durch mehrere Wachstumsschübe charakterisiert ist. Bei Pinus taeda beobachtet man in der Regel 3 - 4 solcher Schübe (WELLS und METZ, 1963), bei Pinus elliottii sogar bis zu 6 - 7 bei normalerweise 3 - 5 (PRITCHETT und SMITH, 1968). Es tritt kaum eine ausgeprägte Ruheperiode auf; dies gilt besonders für P. elliottii (PRITCHETT und SMITH, 1968; BENGSTON et. al., 1967; van GOOR, 1965; SQUILLACE, 1966). Dieses bei entsprechend mildem Klima das ganze Jahr hindurch anhaltende Sproßspitzenwachstum führt zu Problemen bei einer vergleichbaren Nadelprobenahme, wenn beträchtliche Klimadifferenzen im Untersuchungsgebiet auftreten. Dies war in gewissem Umfang bei P. elliottii der Fall, während P. taeda unter gleichförmigen Bedingungen stand.

Schließlich ist nochmals die bei P. elliottii größere Heterogenität in genetischer Hinsicht hervorzuheben. Verschiedene Samenprovinienzen, etwaiges Auftreten von Standortsrassen u. ä. beeinträchtigen Wachstumsvergleiche und nadelanalytische Auswertungen. Aufgrund der Untersuchungen von WALKER und HATCHER (1965), PRITCHETT und GODDARD (1967), PRITCHETT und SMITH (1968) und SQUILLACE (1966) sind derartige Einflüsse bei Pinus elliottii auch bei den südbrasilianischen Aufforstungen nicht auszuschließen.

8.2. Nährelementversorgung

Eine Reihe der oben gemachten Einschränkungen bei der Aussage über die Wuchsleistung sind auch bei der Betrachtung der Mineralstoffversorgung bzw. der Ansprüche beider Baumarten zu beachten. Trotzdem ist eine vergleichende Gegenüberstellung der analysierten Werte nützlich, zumal es

sich um erste Daten für die südbrasilianischen Aufforstungsgebiete handelt (s. Tab. 25). Für die Hauptnährelemente P, K, Ca und Mg lassen sich kaum Differenzen zwischen beiden Baumarten erkennen, wohl jedoch für Stickstoff. Hier liegt Pinus taeda deutlich höher. Unsere Daten bestätigen somit teilweise frühere Aussagen von Mc GREGOR und GÖBEL (1968), nach denen Pinus taeda bei den meisten Hauptnährelementen höhere Gehalte in den Nadeln zeigt. Vermutlich spiegelt sich darin ein höherer Nährstoffbedarf von Pinus taeda für optimales Wachstum wider.

Bei den Gehalten der Mikronährelemente fällt das höhere Niveau der Fe-Werte bei Pinus taeda auf. Dies erklärt sich aber vermutlich durch lithogene Unterschiede der Standorte, die in sehr verschiedener Anzahl bei den beiden Baumarten vertreten waren. Die Versorgung mit Cu scheint bei Pinus elliottii besser. Deutliche Unterschiede zeigt Al. Die höheren Gehalte bei Pinus taeda sind in Übereinstimmung mit der Literatur (z. B. HUMPHREYS und TRUMAN, 1964); vermutlich läßt sich daraus auf eine größere Toleranz von Pinus taeda gegenüber diesem in hoher Konzentration toxisch wirkenden Element schließen.

Wenngleich gravierende ernährungskundliche Unterschiede zwischen den beiden Baumarten in Südbrasilien nicht festzustellen sind, lassen sich doch höhere Ansprüche bzw. größere Empfindlichkeit bei Pinus taeda feststellen. Diese Baumart benötigt zur Erzielung guter Wuchsleistung einen hohen N- und P-Spiegel in den Nadeln sowie eine ausreichende Versorgung mit den übrigen Nährelementen. Hinweise auf mangelhafte Versorgung auf einigen Standorten finden sich bezüglich K, Ca, Mg und Zn.

Nach unseren Daten lassen sich für Pinus taeda in Südbrasilien folgende Grenzwerte des Mangelbereichs aufstellen:
K 4,0 ; Ca 0,50; Mg 0,80 mg/g T.S. sowie Zn 10 ug/g T.S.
Für den obersten Mineralboden, d.h. den Hauptwurzelbereich junger Aufforstungen lassen sich folgende Grenzwerte für die Gehalte im Zitronensäureextrakt angeben:
K mindestens 10; Ca mindestens 30 und Mg mindestens 10 ug/g T.S. Boden.

Diese Grenzwerte sollten bei der Auswahl künftiger Aufforstungsgebiete unbedingt berücksichtigt werden bzw. zur Kontrolle von Aufforstungsbeständen verwendet werden. Für Pinus elliottii lassen sich nach den bisherigen Untersuchungen noch keine speziell für Südbrasilien gültigen Grenzwerte angeben, da die Versorgung dieser Baumart in den Aufforstungsgebieten Südbrasiliens offenbar weithin ausreichend bis gut ist.

Diese ausreichende bis optimale Nährelementversorgung von Pinus elliottii und überwiegend auch bei Pinus taeda im Untersuchungsgebiet Südbrasiliens steht in deutlichem Gegensatz zur Situation im Verbreitungsgebiet in den USA. Dort treten weithin wachstumsbegrenzender P-Mangel, teilweise aber auch N- und K-Mangel auf. Die Ernährungsverhältnisse und damit auch die Wuchsleistung von Pinus taeda und Pinus elliottii sind im weltweiten Vergleich in Südbrasilien durchweg günstig einzustufen. Beide Baumarten verdienen daher auch in Zukunft bei Aufforstungsvorhaben große Beachtung.

Tabelle 25: Vergleich der nadelanalytischen Daten von P. taeda und P. elliottii in Südbrasilien (Mittelwerte und Schwankungsbreite)

Pinus taeda L.										
N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Al
mg/g T. S.					ug/g T. S.					
19,0	1,30	7,96	1,59	1.02	155	343	41	5	20	1041
17,8-23,5	1,18-1,60	3,50-11,48	0,53-2,75	0,48-1,61	130-210	210-498	10-83	3,7-7,9	9-29	875-1375

Pinus elliottii Engelm. var. elliottii										
N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Al
mg/g T. S.					ug/g T. S.					
14,1	1,47	7,34	2,25	1,32	83	364	54	8,9	25	635
11,8-15,9	1,15-1,81	3,85-11,75	1,07-3,53	0,96-1,67	49-170	85-600	30-75	4,3-13,0	11-33	388-950

9. ZUSAMMENFASSUNG

Hauptziel der Arbeit ist die Untersuchung der Beziehungen zwischen Mineralstoffversorgung und Wuchsleistung von Aufforstungsbeständen in Südbrasilien. Herangezogen wurden Aufforstungsflächen der beiden wichtigsten Kiefernarten Pinus taeda und Pinus elliottii innerhalb des ökologisch abgegrenzten Raumes in den Staaten Paraná, Santa Catarina und Rio Grande do Sul. Es handelt sich um die erste Untersuchung dieser Art in Südbrasilien.

Für Pinus taeda wurden 19 Probestandorte in einem klimatisch einheitlichen Teilbezirk ausgewählt. Bei Pinus elliottii wurden 32 Probestandorte, verteilt auf 6 Teilbezirke im gesamten Untersuchungsgebiet, erfaßt.

Das Alter der Bestände ist durchweg einheitlich (8 Jahre), ebenso ihre Begründung und bisherige Behandlung (noch nicht durchforstet, nicht gedüngt). Der Pflanzabstand beträgt bei Pinus elliottii einheitlich 2,0 x 2,0 m und bei Pinus taeda 2,5 x 2,5 m.

Die Wuchsleistung der Bestände wurde erfaßt durch Bestimmung der Oberhöhe der 100 stärksten Bäume pro ha. Die Versorgung der Bäume mit Makro- und Mikronährelementen wurde charakterisiert durch Bestimmung des Gesamtgehaltes der Elemente in den halbjährigen Nadeln, die Bestimmung vom Gesamtgehalt und extrahierbarem Anteil im obersten Mineralboden (0 - 20 cm) sowie die Bestimmung der Elementgehalte in der organischen Auflage (L- und F-Lage).

Die Standortsdifferenzierung erfolgte nach Ausgangsgestein (Basalt, Diabas, Tonschiefer, Sandstein sowie alluviale Sedimente), Bodentyp (vor allem Latosol, "Podsólico Vermelho Amarelo", Terra Rocha), Jahresniederschlag, Jahresmitteltemperatur und durch Beurteilung der Landnutzung vor der Aufforstung.

Die untersuchten Bestände von Pinus taeda sind nach den nadelanalytischen Daten mit den Nährelementen N, P, Fe, Mn, Cu und B durchweg gut versorgt. Zwischen den Nadelspiegelwerten dieser Elemente und der Wuchsleistung lassen sich keine Beziehungen erkennen. Die Gehalte von K, Ca und Mg in den halbjährigen Nadeln stehen in signifikanter positiver Beziehung mit der Wuchsleistung. Die schlechtwüchsigen Standorte zeigen sehr geringe Gehalte dieser Elemente, die deutlich im Mangelbereich liegen. Auch für Zn besteht eine enge Korrelation zwischen den Nadelgehalten und der Wuchsleistung, wobei wiederum die gleichen sehr schlechtwüchsigen Bestände die niedrigsten Zn-Werte aufweisen. Die Wuchsleistung kann somit auf einem Teil der Standorte durch unzureichende Versorgung mit den vier genannten Elementen begrenzt sein, ohne daß nach den vorliegenden Daten eine Differenzierung unter diesen Elementen vorzunehmen ist. Eine Aussage über eventuellen Zinkmangel ist infolge Fehlens eindeutiger Grenzwerte für dieses Element zweifelhaft.

Die Daten der organischen Auflagen stehen in charakteristischer Beziehung zu den Werten der halbjährigen frischen Nadeln und machen deutlich, daß diese biologisch noch kaum abgebauten organischen Auflagen praktisch allein aus der Kiefernstreu gebildet wurden.

Von den Analysendaten des obersten Mineralbodens sind die zitronensäurelöslichen Anteile von guter Aussagekraft für die Nährelementversorgung. Es bestehen enge Korrelationen zwischen den Gehalten an zitronensäurelöslichem K, Ca und Mg im Mineralboden mit dem Versorgungsgrad dieser Elemente in den Nadeln. Diese Abhängigkeit ist nur teilweise direkt gesteinsbedingt.

Ein gewisser Einfluß des Ausgangsgesteins bzw. des Bodentyps auf die Nährelementversorgung scheint jedoch durch: im allgemeinen haben die Diabas-Standorte mit Terra Rocha bzw. Ranker optimale Nährelementversorgung und beste Wuchsleistung. Das schlechteste Wachstum beobachtet auf Sandstein, besonders bei Böden des Typs "Podzólico Vermelho Amarelo". In der Latosol-Gruppe ist das Wachstum unterschiedlich. Hier liegt ein Spitzenstandort, der aber offenbar eine Verbesserung durch Zufuhr von

Diabasmaterial erfahren hatte. Weite Gebiete mit Latosolen und insbesondere die Böden aus Diabas eignen sich somit hervorragend für die Aufforstung mit Pinus taeda.

Aus den Untersuchungen lassen sich erstmalig für Südbrasilien gültige Grenzwerte der Nadelanalysen mitteilen: Werte unter 4,0 mg/g K, unter 0,5 mg/g Ca, unter 0,8 mg/g Mg und unter 10 ug/g Zn zeigen die entsprechenden Mangelbereiche an. Nach den Bodenanalysen gelten folgende Werte für die zitronensäurelöslichen Gehalte als Grenze des Mangelbereichs: K 10 ug/g, Ca 30 ug/g und Mg 10 ug/g.

Eine systematische Kontrolle von Aufforstungsbeständen mithilfe der Nadelanalyse wird künftig aufgrund der hier vorgelegten Ergebnisse wichtige Prognosen für die Wuchsleistung bzw. Düngebedürftigkeit der Bestände liefern. Die erarbeiteten bodenanalytischen Grenzwerte können vorteilhaft zur Beurteilung der Eignung von Standorten für die Aufforstung mit Pinus taeda herangezogen werden.

Bedeutsam ist die Feststellung einer sehr geringen biologischen Aktivität in den organischen Auflagen der jungen Aufforstungsbestände, die sich in den sehr weiten C/N- und C/P-Verhältnissen widerspiegelt.

Auch für Pinus elliottii war eine allgemein gute Nährelementversorgung nachzuweisen. Infolge der großen klimatischen Differenzierung der untersuchten Standorte dieser Baumart und der meist guten Mineralstoffversorgung ließen sich keine Korrelationen zwischen nadelanalytischen Daten und Wuchsleistung nachweisen. Lediglich für Stickstoff scheint eine positive signifikante Beziehung auf, wenn man die Probeflächen zu Standortsgruppen zusammenfaßt. Zusammen mit der absoluten Höhe des Stickstoffspiegels der Bestände läßt sich für eine Reihe der Standorte eine wachstumsbegrenzende ungenügende Versorgung mit Stickstoff wahrscheinlich machen. Hier spielt vermutlich die Bodennutzungsart bzw. natürliche Vegetation vor der Aufforstung eine Rolle, von der der Stickstoffvorrat im Mineralboden abhängt. Auch die P-Versorgung ist zum Teil mit der Variation im Stickstoffhaushalt gekoppelt.

Die besten Wuchsleistungen von Pinus elliottii beobachtet man auf den leichten sandigen Böden (Sandstein-Latosol und "Areias Quartsosas" (alluviale Sedimente). Diese Standorte liegen in den Untersuchungsbezirken Ponta Grossa (6) und Sao Francisco do Sul (2), die sich klimatisch stark unterscheiden. Beide Bezirke stellen jedoch nach den vorliegenden Daten ein sehr hohes Wachstumspotential für Pinus elliottii. Dabei sind allerdings die geringen Nährstoffvorräte auf den "Areias Quartsosas" zu bedenken, die jedoch durch das in diesem Untersuchungsbezirk 2 herrschende sehr warme Klima kompensiert werden.

Schlechtes Wachstum zeigt Pinus elliottii auf schweren oder sehr stark erodierten Böden. Auch Gley-Standorte mit hoch anstehendem Grundwasser eignen sich nicht für Aufforstungen mit dieser Baumart, wohl aber dränierte Gleye. Auch für Pinus elliottii lassen sich nach den vorliegenden Ergebnissen praktisch-forstlich bedeutsame Diagnosen oder Prognosen über die Wuchsleistung aufgrund von Nadel- und Bodenanalysen geben.

Beim Vergleich der Wuchsleistung beider Baumarten schneidet Pinus taeda deutlich besser ab. Diese Baumart ist aber auch anspruchsvoller hinsichtlich der Nährelementversorgung.

Im weltweiten Vergleich zeigt aber auch Pinus elliottii im südbrasilianischen Untersuchungsgebiet noch sehr gute Wuchsleistungen. Sie liegen im allgemeinen klar über denen des natürlichen Anbaugebietes in den Südoststaaten der USA. Dort begrenzt Phosphormangel weithin das Wachstum, während die Versorgung mit diesem Nährelement in Südbrasilien im allgemeinen gut ist.

10. LITERATURVERZEICHNIS

BABEL, U.; KREUZER, K.; ULRICH, B.; von ZEZCHWITZE, E., ZOTTL, H. W. 1980. Definitionen zur Humusmorfologie der Waldböden. Z. Pflanzenernährung Bodenk. 143: 564-568.

BALLARD, R. und PRITCHETT, W. L. 1975a. Utilization of soil and fertilizer phosphorus compounds by slash pine seedlings in relation to their solubility in soil test extractants. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 30: 537-540.

BALLARD, R. und PRITCHETT, W. L. 1975b. Evaluation of soil testing methods for predicting growth and response of pinus elliottii to phosphorus fertilization. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 39: 132-136.

BAULE, H. und FRICKER, C. 1970. Die Düngung von Waldbäumen. München, BLV Verlagsgesellschaft, 259 S.

BAUMEISTER, W. und ERNST, W. 1978. Mineralstoffe und Pflanzenwachstum. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 416 S.

BAUR, G. N. 1959. A soil survey of a slash pine plantation. Barcongere, N. S. W. Australia Forest. 23: 78-87.

BEATON, J. D., BROWN, G., SPEER, R. C., MacRAE, I., McGHEE, W. P. T., MOOS, A. und KOSICK, R. 1965. Concentration of Micronutrients in foliage of three coniferous tree species in British Columbia. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 26: 299-302.

BENGSTON, G. W und VOIGT, G. K. 1962. A greenhouse study of relations between nutrient movement and conversion in a sandy soil and the nutrition of slash pine seedlings. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 26: 609-612.

BIGARELLA, J. J. 1954. Esboço da geografia e Paleogeografia do estado do Paraná. Bol. no. 29, IBPT. Curitiba.

BILAN, M. V. 1968. Effects of physical soil enviroment on growth and Development of Roots systems in southern Pines. In: Forest Fertilization-theory and practice. T. V. A. National Fertilizer Development Center. 15-19. Muscle Schools. Alabama.

BLUM, W. E. H. und HILDEBRAND, E. E. 1977. Nährelementversorgung und Wachstum von Araucaria angustifolia (Bert.) O. Ktze., auf zwei Toposequenzen in Paraná/Südbrasilien. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 25: 357-366.

BRASIL. 1973. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul. D. N. P. A., Divisão de Pesquisa Pedológica. Bol. técnico D. N. P. A., 30. 431 S.

BRUM, E. T. 1979. Relaçoes entre a altura dominante e fatores do sito, em povoamentos de Pinus elliottii Engelm. na região de Ponte Alta do Norte; Tese de Mestrado - Curso de Pósgraduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciencias Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

CENTRO DE PESQUISAS PEDOLÓGICAS. 1974. Levantamento de reconhecimento do sudeste do estado do Paraná. - 1.ª parte. (Informe preliminar) EMBRAPA. Ministério da Agricultura. Bol. 40. 150S.

CENTRO DE PESQUISAS PEDOLÓGICAS. 1975. Aptidão agrícola dos solos do noroeste do estado do Paraná. EMBRAPA. Ministério da Agricultura. Bol. 32. 42 S.

CHENERY, E. M. und SPORNE, K. R. 1976. A note on the evolutionary status of Aluminium-accumulators among dicotyledons. New Phytol., 76: 551-554.

DEDENON, J. M. und CARLIER, G. 1975. Analise élémentaire des Végétaux. Extrait de la publication AFOCEL 1975. 15-52. Nangis, France.

De HOOGH, R. 1973. Experimentos de fertilização em Araucaria angustifolia. FAO/IBDF/BRA 71/545, proj. 17. mimeogr. 8 S.

DE HOOGH, R. und DIETRICH, A. B. 1979. Avaliação de sítio para Araucaria angustifolia (bert) O. Ktze, em povoamentos artificiais. Brasil Florestal. 37: 19:17.

DIVISAO DE PESQUISA PEDOLÓGICA. 1972. Levantamento de reconhecimento do oeste do estado do Paraná. (informe preliminar) D. N. P. A. Ministério da Agricultura. Bol. 39, 97 S.

DIVISAO DE PESQUISA PEDOLÓGICA. 1971. Levantamento de reconhecimento do nordeste do estado do Paraná. (Informe preliminar) D. N. P. A. Ministério da Agricultura. Bol. 16, 144 S.

DIXON, J. B., und WEAR, J. I. 1964. X-Ray spectrographic analyses of zink, manganese, iron and copper in plant tissue. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 28: 744-746.

DUCHAUFOUR, Ph. 1959. La dynamique du sol forestier en climat atlantique. Les Presses Universitaires Laval. Québec, Canada, 72 S.

DUCHAUFOUR, Ph. 1967. La podzolization en climat atlantique. In: Anales de edafologia y Agrobiologia. 26 (1-4): 241-258. Madrid.

DUCHAUFOUR, Ph. 1970. Précis de Pédologie. Masson et Cie, Éditeurs. 481 S. Paris.

EMBRAPA/IAPAR. 1977. Levantamento de reconhecimento dos solos do Litoral do estado do Paraná. Informe Preliminar. Serviço Nacional de Lev. e Cons. de Solos, Bol. téc. no. 59. Projets de Lev. de Solos, Bol. téc. n. o9. Conv. SUDESUL/EMBRAPA/ GOV. Do Est. /IAPAR.

EQUIPE DE PEDOLOGIA E FERTILIDADE DO SOLO. 1970. Levantamento de reconhecimento dos solos do noreste do estado do Paraná. (informe preliminar) E. P. F. S. Ministério da Agricultura. Bol. 14, 102 S.

EPSTEIN, E 1975. Nutrição mineral das plantas: princípios e perspectivas. Rio de Janeiro, Livros Técnicos es Científicos, 341 S.

FASSBENDER, H. W. 1980. Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Ciencias Agricolas. Editorial IICA. 398 S. San José, Costa Rica.

FIALA, K. 1973. Direkte Bestimmung von Bor im Pflanzenmaterial nach der Kurkuminmethode. Plant and Soil. 38: 473-476.

FIALA, K. 1974. Bestimmung von Bor in Bodenextrakten mit Hilfe der direkten Kurkuminmethode. Arch. Acker- und Pflanzenbau u. Bodenk. 18: 323-327.

FINK, A. Pflanzenernährung in Stichworten. Kiel, F. Hirt, 1969. 200 S.

FIEDLER, H. J., NEBE, W. und HOFFMANN, F. 1973. Forstliche Pflanzenernährung und Düngung. Stuttgart, G. Fischerverlag 481 S

FOIL, R. R. und RALSTON, C. W. 1967. The establishment and Growth of Loblolly Pine Seedlings on Compactet Soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 31: 565-568.

FOWELLS, H. A. und KRAUSS, R. W. 1959. The inorganic nutrition of Loblolly pine and Virginia pine with special reference to nitrogen and phosphorus. For. Sci., 5: 95-112.

FREESE, F. 1967. Elementary statistical methods for foresters. Washington, U. S. Forest Service. Agriculture Handbook 317. 87 S.

FUPEF FUNDAÇÃO DE PESQUISAS FLORESTAIS. 1977. Levantamento básico para um Plano de Manejo. Relatório I. Equipe de ordenamento. (nicht publiziert)

GOLFARI, L. 1968. Breve comentário sobre o zoneamento bio climático do sul do Brasil em relação ao reflorestamento com coníferas. IBDF/FAO, Congresso Florestal Brasileiro (Curitiba. PR-Brasil)

GOLFARI, L. 1970. Coníferas aptas para o reflorestamento nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. B. técnico IBDF, 1, 57 S.

GOOR, C. P. van. 1965. Reflorestamento com coníferas no Brasil. Aspectos ecológicos dos Plantios na região sul, particularmente com Pinus elliottii e Araucária angustifólia. B. Setor de Inventários Florestais, 9. 58 S.

GOOR, C. P. van. 1965/1966. Classificação da capacidade da Terra em relação ao reflorestamento com Pinus elliottii engelm. var. elliottii e Araucária angustifólia (Bert) O. Ktze., no estado de São Paulo. Silvicultura em São Paulo 4/5 (4): 349-366.

GURGEL FILHO, O. A. 1965/1966. Silvicultura e economia de Pinus no estado de São Paulo. Silvicultura em São Paulo 4/5 (4): 209-233.

HEIBERG, S. O. und WHITE, D. P. 1951. Potassium deficiency of reforested pine and spruce stands in northern New York. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 15: 369-376.

HEIBERG, S. O. und WHITE, D. P. 1956. A site evaluation concept. Jour. For., 54: 7-10.

HEIN, H., und SCHRADER, W. 1975. Grundpraktikum für das Arbeiten mit der Graphitrohrküvette HGA 74. Analysentechnische Berichte, (40). Bodenseewerk Perkin-Elmer u. Co. GmbH, Ing.-Büro Frankfurt.

HEIN, H., und SCHRADER, W. 1976. Anwendungstechnische Grundlagen für das Arbeiten mit der Graphitrohrküvette HGA 76. Angewandte Atom-Absorptionsspektroskopie, (3). Bodenseewerk Perkin Elmer u. Co. GmbH, Ing.-Büro Frankfurt

HILDEBRAND, E. E., W. BLUM, W. E. H., DIETRICH, A. B. 1976. Metodologia da amostragem e análise química das acículas da Araucaria angustifolia (Bert) O. K. tze. II. Rev. Floresta VII (2), 9-15. Curitiba.

HOCKER Jr., H. W. 1956. Certain aspects of climate as related to the distribution of Loblolly pine. Ecol. 37 (4): 824-834.

HUMPHREYS, F. R. und PRITCHETT, W. L. 1972. A soil testing procedure for predicting phosphorus status of Pinus elliottii plantations. Plant and Soil, 37: 495-487.

HUMPHREYS, F. R. und PRITCHETT, W. L. 1964: Aluminium and the phosphorus requirements of Pinus radiata. Plant and soil, 20: 131-134.

IBDF INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL 1979. Projetos protocolados na DEPR. período 1971/1979. G. A. P. (Mimeografado)

JACKSON, M. L. 1960. Soil chemical analysis. Printice-Hall. Inc. Englewood cliffs, N. J.

JORGE, A. J. 1973. Fósforo. In: Elementos de Pedologia. A. C. Moniz coord. Edit. Poligono. Univ. S. Paulo, 191-197.

JÖRGENSEN, J. R. und WELLS, C. G. 1973. The relationships of respiration in organic and mineral soil layers to soil chemical properties. Plant and Soil, 39: 373-387.

KLEIN, R. M. 1960. O aspecto dinamico do pinheiro brasileiro. Sellowia, 12: 17-44.

KNICKMANN, E. 1955. Handbuch der landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik, Bd. 1 - Berlin.

KOCH, P. 1972. Utilization of the Southern pines. Vol. I., The Raw Material. Washington, U. S. Forest. Service. Agriculture Handbook, 317. 731 S.

LA BASTIDE, I. G. A. und van GOOR, C. P. 1970. Growth-site Relationships in plantations of Pinus elliottii and Araucaria angustifolia in Brazil. Plant and soil 32: 349-366.

LADEIRA, H. P. 1977. Wirtschaftliche Kriterien für die Gründung von Holzindustrien und die Verbesserung der Infrastruktur in Entwicklungsländern. Inaugural-Dissertation. Forstwissenschaftliche Fakultät, Universität Freiburg i. Br.

LEAF, A. L. 1968. K, Mg and S Deficiences in forest trees. in: Forest Fertilization theory and practice. 88-122. T. V. A. National Fertilizer Development Center Muscle Schools, Alabama.

LEAF, A. L. 1973. Plant analysis as an aid in fertilizing forests. In: WALSH, L. M. u. BEATON, J. D. (ed.) Soil Testing and Plant Analysis. Madison, Soil Science Soc. Amer., cap. 25: 427-454.

LEAR. D. E. van, und GOEBEL, N. B. 1976. Leaf fall and forest floor characteristics in Loblolly pine plantations in the South Caroline Piedmont. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 40 (1): 116-119.

LEAR, D. E. van, und GOEBEL, N. B. 1980. Effects of nitrogen, phosphorus, and lime on the forest floor and growth of pole-size Loblolly pine. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 44(4): 838-841.

LENTSCHIG, S. und CZERNEY, P. 1968. Zum Spurenelementgehalt des Fichtenhumus. Deutsche Akademie der Landwirtschaft, Berlin, Tagungsberichte Nr. 84: 173-186.

LEPSCH, I. F. 1972. Classificação e Manejamento dos solos do estado de Sao Paulo. In: Elementos de Pedologia. A. C. Moniz coord. Edit. Poligono. Univ. S. Paulo. 377-390.

LINNARTZ, N. E. 1963. Relation of soil and topographic characteristics to site quality for Southern Pines in the Florida Parisches of Lousiana. Jour. For. 434-438.

LITTLE, E. L. Jr. und DORMAN, W. K. 1952. Slash pine (Pinus elliottii) its nomenclature and varities. J. For., 50 (12): 918-923.

LUTZ, H. J. und CHANDLER, R. F. Jr. 1947. Forest Soils. Ed. by John Wiley u. Sons. Inc. New York, 514 S.

MAACK, R. 1947. Breves notícias sobre a geologia dos estados do Paraná e Santa Catarina. Arquivos de Biologia e Tecnologia. Vol. II. IBPT-Secretaria da Agricultura, Ind. e Com. Curitiba.

MAACK, R. 1968. Geografia física do estado do Paraná. Publicado sob os auspícios do Banco de desenv. do Paraná, da U. F. P. e do Inst. de Biol. e Pesq. Tec., Curitiba. 350 S.

Mac CARTHY, R. und DAVEY, C. B. 1976. Nutritional problems of Pinus taeda L. (Lobllolly pine) Growing on Pocosin Soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 40: 582-586.

MAGNANINI, R. L. C. Mapa climático. In: Brasil. Conselho Nacional de Geografia. Geografia do Brasil. Grande Região Sul. Rio de Janeiro. 215 S.

McGEE, C. E. 1963. A nutritional study of Slash pine seedlings grown in sand culture. For. Sci., 9: 461-469.

McGREGOR, W. M. H. D. GOEBEL, N. B. 1968. Effectiveness of N fertilizers and mulch for the amelioration of severe planting sites. Ed. by ChesterT. Youngberg and Charles B. Davey. in: Tree Growth and Forest Soils. Corvallis: Oregon State University Press. 65-72.

METZ, L. J. 1952. Weight and nitrogen and calcium content of the annual Litter fall of the forests of the South Carolina Piedmont. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 16: 38-41.

METZ, L. J., WELLS, C. G. und SWINDEL, B. F. 1966. Sampling soil and foliage in a pine plantation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 30: 397-398.

MOLL, W. 1977. Bodenkundliche Untersuchung von Waldstandorten in Südchile. Publik. i. Vorber. Boske.

NEBE, W. 1966. Über die Düngebedürfigkeit von Fichtenbeständen im Mittelgebirge. Arch. Forstwes. 15: 929-952.

PRITCHETT, W. L. 1963. Fertilizing slash pine on the sandy soils of Florida. Soil and crop. Sci. Soc. Florida Proc. 23: 104-108.

PRITCHETT, W. L. 1979. Properties and management of forest soils. John Wiley u. Sons. New York. 500 S.

PRITCHETT, W. L. und GODDARD, R. E. 1967. Differential response of Slash pine progeny lines to some cultural practices. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 31: 280-284.

PRITCHETT, W. L. und SMITH, W. H. 1968. Fertilizing Slash pine on sandy soils of the lower Coastal plain. In: Tree Growth and Forest Soils (Ed.) Chester T. Youngberg and Charles B. Davey. 19-41.

PRITCHETT, W. L. und SWINFORD, K. R. 1961. Response of Slash pine to colloidal phosphate fertilization. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 25: 397-400.

PRUSINKIEWICZ, Z. und KRZEMIEN, K. 1974. Toxic effect of free Aluminium from the artstein Horizon of podzol on growth of scots pine (Pinus silvestris L.)Seedlings. Department of Soil Science, N. Copernicus University in Toruń. Roczniki Gleboznawcze T. XXV, Z. 3; 207-222. Warszawa.

RALSTON, C. W. und BARNES, R. L. 1955. Soil properties related to the growth and yeld of slash pine plantations in Florida. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 19 (1): 84-85.

RALSTON, C. W. und PRINCE, A. B. 1966. Accumulation of dry matter and nutrients by pine and hardwood Forests in the Lower Piedmont of North Carolina. In: Forest soils relationships in North America. (Ed.) Chester T. Youngberg. Oregon State University Press. Corvallis.

REHFUESS, K. E. 1968. Zusammenhänge zwischen dem Ernährungszustand und der Bonität nordostbayerischer Tannenbestände (Abies alba Mill.). Forstwissenschaftliches Centralblatt. 87, Heft 5: 257-320.

SANTOS FILHO, A. 1977. Genese und Eigenschaften repräsentativer Bodentypen in der Schichtstufenlandschaft des Staates Paraná, Brasilien. Inaugural-Dissertation Forstwissenschaftliche Fakultät der Universität Freiburg i. Br.

SANTA MARIA. 1973. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado de Santa Catarina. Santa Maria, Univ. Federal. Acordo U. F. S. M-SUDESUL-Secr. de Agricultura. 248 S.

SCHEFFER, F. und SCHACHTSCHABEL, P. 1976. Lehrbuch der Bodenkunde. 9 Aufl. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart. 394 S.

SERVIÇO NACIONAL DE LEVANTAMENTO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS. 1976. Aptidão agricola dos solos do sudoeste do estado do Paraná (Area 7) EMBRAPA. Ministério da Agricultura. Bol. 51. 32 S.

SCHOPMEYER, C. S. 1961. Foliar absorption and translocation of phosphorus by Loblolly pine sedlings. For. Sci., 7 (4): 330-335.

SOIL SURVEY STAFF. 1967. Supplement to soil classifikation system (7th. Aproximation) U. S. Dept of Agric. 207 S.

SQUILLACE, A. C. 1966. Geographic variation in Slash pine. For. Sci. Monogr. 10.

STANDART METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WAST WATER. 12 Edit. C. N. V Public Health Assoc. 1965. 291-293.

STEEL, R. G. D. und TORRIE, J. H. 1960. Principles and procedures of statistics with special reference to the biological sciences. New York, Mc Graw Hill. 481 S.

STOATE, T. N. 1950. Nutrition of the Pine. Forest and Timber Bur. (Austr.) Bull 30. 61 S.

STONE, E. L. 1968. Microelement nutrition of forest trees: A Review. In: Forest Fertilization - theory and practice. 132-175. T. V. A. National Fertilizer Development Center. Muscle Schoals, Alabama.

SWITZER, G. L. und NELSON, L. E. 1972. Nutrient Accumulation and cycling in Loblolly pine (Pinus taeda L.) plantation ecosystems: The first twenty years. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 36: 143-147.

TAMM, K. O. 1955. Seasonal variation in the nutrient content of conifer needles. Medd. f. Statens Skogsfonkningsinst. 45 (5/6).

THAMES, J. L. 1963. Needle variation in Loblolly pine from four geographic seeds sorces. Ecology. 44(1): 168-169.

VIEIRA, L. S. 1975. Manual da Ciência do Solo. São Paulo, Ed. Agronomica Ceres. 464 S.

VOIGT, G. K. 1968. Variation in nutrient uptake by trees. In: Forest Fertilization-theory and practice. T. V. A. National Fertilizer Development Center Muscle Schools. Alabama.

WAIL, J. W., PARRY, M. S. und CARTON, W. E. 1961. Boron deficiency and die back in Pines. Plant and Soil, 14: 393-398.

WALKER, L. C. 1955. Foliar analysis as a method of indicating potassium - deficient soils for reforestation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 19: 233-236.

WALKER, L. C. and HATCHER, R. D. 1965. Variation in the ability of Slash pine progeny groups to absorb nutrients. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 29: 616-621.

WEHRMANN, J. 1959. Die Mineralstoffernährung von Kiefernbeständen (Pinus silvestris) in Bayern. Forstwiss. Cbl. 79: 221-236.

WELLS. B. 1975. Atom-Absorptions-Spectroskopie. 2., völlig neu bearbeitete Auflage. Verlag Chemie, GmbH, Weinheim.

WELLS, C. G. 1965. Nutrients relationships between soils and needles of Loblolly pine (Pinus taeda L). Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 29: 621-624.

WELLS, C. G. 1968. Techniques and Standarts for foliar diagnosis of N deficiency in Loblolly Pine. In: Forest Fertilization - theory and practice. 72-76 T. V. A. National Fertilizer Development Center. Muscle Schools, Alabama.

WELLS, C. G. und METZ, L. J. 1963. Variation in nutrient content of Loblolly pine needles with season, age, soil and position on the crown. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 27: 90-93.

WHITE, D. P. 1954. Variation in the N, P and K contents of Pine needles with season, crown position and sample treatments. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 18 (3): 326-330.

WHITE, J. D.; WELLS C. G. und CLARK E. W. 1970. Variation in the inorganic composition of inner bark and needles of Loblolly pine with tree height and soil series. Ca. I. Bot. 48: 1079-1084.

WHITE, J. D. und PRITCHETT, W. L. 1970. Water table control and fertilization for Pine production in the flatwoods. Univ. Fla. Agr. Exp. Sta. Bull. 743. 41 S.

WILDE, S. A., VOIGT, G. K., IYER, J. D. 1964. Soil and plant analysis for tree culture. Ed. by y. satyanarayan. Central Arid Zone Research Institut. Joclhpur. India.

WILKINSON, H. F. 1972. Movement of micronutrients to plants roots. In: Nutrients in Agriculture 139-169 (Ed.) Mortvedt, J. J. Giordano, P. M. Lindsay, W. L. Soil Science of America Inc. Madison, Wisconsin USA.

WOOLDRIDGE, D. D. 1968. Chemical and physical properties of forest Litter Layers in Central Washington. In: Tree Growth and Forest Soils. Ed. by Chester T. Youngberg and Charles B. Davey. Corvallis: Oregon State University Press.

ZAHNER, R. 1958. Site quality relationships of pine forests in southern Arkansas and northern Lousiana. For. Sci., 4: 162-176.

ZAHNER, R. 1962. Loblolly pine site curves by soil groups. For. Sci., 8: 104-110.

ZÖTTL, H. W. 1967. Die Nachlieferung von Stickstoff aus dem Bodenvorrat. Symposium Nitrogen in Soil, Groningen. In: Nitrogen, Dutch Nitrogenaus Fertilizer Review, August 1968 (12): 8 - 16.

ZÖTTL, H. W. und TSCHINKEL, H. 1971. Nutrición y Fertilization Forestal: una guia practica. Medellin, Universidade Nacional de Colombia. Dep. Recursos Forestales. 111 S.

ZÖTTL, H. W. 1974. Veränderungen im Mackrcelementumsatz gedüngter Kiefernbestände. Mitteilungen Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 20: 339-346.

11. ANHANG

11.1. Pinus Taeda

Tabelle 1: Angaben zu den Probeflächen von Pinus Taeda im Bezirk 7 (Telêmaco Borba)

Fazenda	Bezeichnung der Probefläche	Bodentyp	Gestein	Vorherige Landnutzung
Mandaçaia	T 83-1	Latosol	Sandstein	"Campo"
	T 83-2	Latosol		
	T 94-1	Latosol		
	T 94-2	Podzólico Vermelho Amarelo		
	T 94-3	Podzólico Vermelho Amarelo		
	T 94-4	Latosol		
Mirandinha	T 204-5	Latosol	Sandstein	"Campo" und Landwirtschaft
	T 204-6	Latosol		
	T 203-1	Podzólico Vermelho Amarelo		
	T 203-2	Podzólico Vermelho Amarelo		
	T 203-3	Podzólico Vermelho Amarelo		
	T 203-4	Podzólico Vermelho Amarelo		"Campo"
Pinhal Boncto	T 101a-1	Terra Rocha Estruturada	Diabas	Arankarien-wald
	T 101a-2	Terra Rocha Estruturada		
	T 101a-3	Terra Rocha Estruturada		
	T 101a-4	Terra Rocha Estruturada		
	T 102-1	Ranker	Sandstein	
	T 102-2	Latosol		
	T 102-3	Latosol		

Tabelle 2: Meßdaten der Bestände (Alter 8 Jahre)

Probefläche	h_{100}(m)	$DBH_{(m)}$	Symbol
T 83-1	13,50	0,22	x
T 83-2	12,70	0,24	x
T 94-1	12,90	0,26	x
T 94-2	12,40	0,22	x
T 94-3	12,30	0,22	x
T 94-4	15,70	0,26	x
T 204-5	13,80	0,22	x
T 204-6	14,50	0,23	x
T 203-1	11,20	0,18	x
T 203-2	11,30	0,19	x
T 203-3	11,90	0,21	x
T 203-4	12,90	0,23	x
T 101a-1	13,00	0,23	o
T 101a-2	14,70	0,29	o
T 101a-3	13,90	0,27	o
T 101a-4	14,00	0,25	o
T 102-1	14,70	0,27	o
T 102-2	14,20	0,28	x
T 102-3	13,20	0,26	x

Tabelle 5: Bodendaten: pH-Wert, Humusgehalt, C-Gehalt (Angaben in g/100 g T. S.)

Probefläche	Mineralboden				organ. Auflage	
					L-Lage	F-Lage
	pH(H_2O)	pH ($CaCl_2$)	C	Humus	C	C
T 83-1	4,60	4,10	2,27	3,90	51	49
T 83-2	4,60	4,10	2,05	3,50	50	49
T 94-1	4,60	4,10	1,20	2,10	52	50
T 94-2	4,40	4,00	1,20	2,10	51	51
T 94-3	4,50	4,10	1,56	2,70	48	51
T 94-4	4,70	4,10	2,90	4,90	49	47
T 204-5	4,70	4,10	1,10	1,90	52	50
T 204-6	4,60	4,10	1,48	2,60	52	50
T 203-1	4,60	4,10	1,00	1,70	52	51
T 203-2	4,60	4,10	1,26	2,20	52	51
T 203-3	4,70	4,10	1,23	2,10	52	49
T 203-4	4,70	4,20	0,97	1,70	51	47
T 101a-1	6,20	5,70	2,44	4,20	51	49
T 101a-2	6,30	5,80	2,15	3,70	53	49
T 101a-3	6,30	5,70	2,33	4,00	51	51
T 101a-4	6,80	6,30	2,72	4,70	51	49
T 102-1	6,80	6,40	2,77	4,80	51	49
T 102-2	5,10	4,40	1,40	2,40	50	46
T 102-3	4,80	4,20	2,44	4,20	50	51

Tabelle 3: Nadelanalytische Daten: Makronährelemente
Gehalte in mg/g T.S. Nadeln)

Probefläche	N	P	K	Ca	Mg
T 83-1	20,0	1,29	9,40	1,78	1,16
T 83-2	18,9	1,25	9,25	1,45	1,00
T 94-1	20,3	1,28	11,68	1,35	0,83
T 94-2	18,4	1,28	7,28	1,15	0,85
T 94-3	18,3	1,19	6,98	1,30	0,83
T 94-4	20,0	1,60	8,78	1,73	1,25
T 204-5	23,5	1,30	7,00	1,03	1,01
T 204-6	18,9	1,31	5,20	0,80	0,80
T 203-1	18,5	1,25	3,75	0,70	0,60
T 203-2	18,3	1,25	3,50	0,53	0,48
T 203-3	18,3	1,35	4,00	0,75	0,74
T 203-4	18,3	1,28	4,90	1,05	0,99
T 101a-1	18,7	1,28	9,45	2,35	1,61
T 101a-2	18,2	1,28	8,80	2,30	1,00
T 101a-3	18,7	1,29	10,08	2,73	1,11
T 101a-4	18,7	1,32	9,20	2,15	1,20
T 102-1	17,8	1,40	11,48	2,75	1,27
T 102-2	18,0	1,18	11,03	1,95	1,30
T 102-3	19,3	1,20	9,25	2,45	1,25

Tabelle 4: Nadelanalytische Daten: Mikronährelemente (Gehalte in ug/g T.S. Nadeln)

	Fe	Mn	Zn	Cu	B
T 83-1	210	320	50	4,8	13
T 83-2	198	308	35	4,6	16
T 94-1	210	220	47	4,9	14
T 94-2	138	475	35	5,0	9
T 94-3	130	463	30	5,6	10
T 94-4	158	498	68	7,4	12
T 204-5	200	300	25	4,6	24
T 204-6	165	210	20	5,2	29
T 203-1	130	333	10	6,1	27
T 203-2	130	247	10	3,7	22
T 203-3	130	320	12	4,1	27
T 203-4	135	343	23	4,7	22
T 101a-1	205	408	55	6,9	30
T 101a-2	145	363	82	6,9	15
T 101a-3	140	320	63	6,0	15
T 101a-4	133	320	52	6,5	19
T 102-1	133	350	73	6,9	22
T 102-2	130	378	45	4,2	33
T 102-3	130	338	47	4,2	23

Tabelle 6: Mineralboden: Makronährelemente; Gesamtgehalte (mg/g T. S. Boden)

	N	P+	K	Ca	Mg
T 83-1	1,40	324	0,67	0,55	0,72
T 83-2	1,30	333	0,70	0,60	0,69
T 94-2	0,90	210	2,59	1,05	1,28
T 94-3	1,00	210	1,16	0,60	0,74
T 94-4	1,60	1057	0,69	0,40	1,03
T 204-5	0,60	210	0,59	0,65	0,48
T 204-6	0,70	210	0,44	0,75	0,42
T 203-1	0,60	210	0,55	0,75	0,57
T 203-2	0,40	172	0,59	0,65	0,46
T 203-3	0,70	210	0,55	1,60	0,57
T 203-4	0,60	238	0,57	0,90	0,66
T 101a-1	2,20	800	0,42	2,50	1,50
T 101a-2	1,80	781	0,48	2,50	1,25
T 101a-3	2,20	800	0,57	2,70	1,48
T 101a-4	2,00	762	0,31	2,70	1,12
T 102-1	2,00	771	0,63	3,85	1,35
T 102-2	1,00	181	0,47	1,20	0,50
T 102-3	1,70	304	0,52	1,00	0,71

+ (Angaben in ug/g T. S.)

Tabelle 7: Mineralboden: Gesamtgehalte der Mikronährelemente

Probefläche	Fe+)	Mn	Zn	Cu
T 83-1	47	150	50	35
T 83-2	49	155	30	40
T 94-1	42	120	35	30
T 94-2	27	140	15	20
T 94-3	23	145	20	20
T 94-4	122	520	80	115
T 204-5	28	105	30	20
T 204-6	22	80	20	20
T 203-1	27	95	20	20
T 203-2	21	85	15	20
T 203-3	26	115	25	30
T 203-4	26	1000	20	30
T 101a-1	143	1720	105	190
T 101a-2	126	2040	105	175
T 101a-3	135	1960	120	180
T 101a-4	123	1550	95	160
T 102-1	133	1600	120	165
T 102-2	22	150	10	10
T 102-3	42	220	10	40

+) (Angaben in mg/g T. S.)

Tabelle 8: Mineralboden: Zitronensäurelösliche Fraktion (ug/g T.S. Boden)

Probefläche	Pcitr.	Kcitr.	Cacitr.	Mgcitr.
T 83-1	3,0	27,0	72,0	18,0
T 83-2	3,0	20,0	45,0	15,0
T 94-1	3,0	23,0	59,0	13,0
T 94-2	2,6	13,0	42,0	8,0
T 94-3	2,5	15,0	48,0	11,0
T 94-4	2,5	25,0	94,0	38,0
T 204-5	1,7	10,0	40,0	9,0
T 204-6	1,6	17,0	41,0	10,0
T 203-1	0,7	8,0	37,0	7,0
T 203-2	1,0	7,0	38,0	7,0
T 203-3	2,0	9,0	36,0	8,0
T 203-4	1,0	10,0	35,0	8,0
T 101a-1	2,0	75,0	790,0	150,0
T 101a-2	2,8	55,0	801,0	153,0
T 101a-3	1,9	127,0	807,0	215,0
T 101a-4	2,4	24,0	1014,0	200,0
T 102-1	3,0	31,0	1196,0	200,0
T 102-2	3,4	45,0	187,0	50,0
T 102-3	4,6	43,0	269	39,0

Tabelle 9: L-Lage: Makronährelemente Gesamtgehalte in mg/g T. S.)

Probefläche	N	P	K	Ca	Mg
T 83-1	7,20	0,37	0,67	3,31	0,86
T 83-2	7,20	0,32	0,70	4,50	0,94
T 94-1	6,80	0,28	0,59	3,64	0,88
T 94-2	6,00	0,21	0,42	2,74	0,60
T 94-3	6,20	0,42	0,45	2,53	0,38
T 94-4	6,60	0,38	0,66	5,26	0,84
T 204-5	6,40	0,22	0,39	3,87	0,77
T 204-6	5,90	0,26	0,70	4,41	0,86
T 203-1	5,80	0,45	0,23	2,28	0,37
T 203-2	6,10	0,40	0,20	1,90	0,30
T 203-3	6,10	0,54	0,40	3,50	0,60
T 203-4	6,50	0,37	0,43	3,97	0,88
T 101a-1	5,80	0,48	0,74	5,95	0,79
T 101a-2	4,70	0,47	0,73	5,26	0,91
T 101a-3	7,00	0,79	1,00	6,37	1,15
T 101a-4	6,60	0,28	0,81	6,33	1,12
T 102-1	6,60	0,59	0,79	7,72	1,11
T 102-2	7,20	0,93	1,52	6,11	1,17
T 102-3	4,80	0,68	1,60	5,90	0,87

Tabelle 10: L-Lage: Mikronährlemente (Gesamtgehalte in ug/g T.S.)

Probefläche	Fe	Mn	Zn	Cu	B
T 83-1	301	586	13	6,4	6,0
T 83-2	365	529	25	6,0	4,0
T 94-1	249	396	21	7,0	6,0
T 94-2	230	743	17	6,2	5,0
T 94-3	1080	900	20	5,0	2,0
T 94-4	541	2800	32	9,0	6,0
T 204-5	363	517	9	4,0	5,0
T 204-6	2610	596	14	5,1	3,0
T 203-1	265	576	8	7,5	6,0
T 203-2	256	652	7	3,4	4,0
T 203-3	300	1022	10	3,5	2,0
T 203-4	253	868	11	3,1	4,0
T 101a-1	235	569	21	3,9	6,0
T 101a-2	207	480	41	7,2	10,0
T 101a-3	230	398	24	10,1	9,0
T 101a-4	225	548	29	9,2	10,0
T 102-1	236	372	27	4,5	9,0
T 102-2	254	750	23	8,0	10,0
T 102-3	298	509	22	6,0	6,0

Tabelle 11: F-Lage: Makronährelemente
(Gesamtgehalte in mg/g T. S.)

Probefläche	N	P	K	Ca	Mg
T 83-1	10,6	0,52	0,74	3,97	0,82
T 83-2	8,6	0,51	0,57	4,07	0,66
T 94-1	10,3	0,50	0,50	3,78	0,71
T 94-2	9,4	0,36	0,37	1,92	0,32
T 94-3	9,6	0,24	0,47	3,95	0,72
T 94-4	10,2	0,70	0,59	4,67	0,67
T 204-5	7,2	0,34	0,34	2,60	0,43
T 204-6	10,5	0,68	0,67	1,75	0,39
T 203-1	8,9	0,67	0,31	1,86	0,23
T 203-2	6,9	0,53	0,32	1,24	0,17
T 203-3	8,9	0,79	0,40	2,50	0,42
T 203-4	8,7	0,51	0,48	2,84	0,51
T 101a-1	11,3	0,58	0,66	7,41	0,87
T 101a-2	10,6	0,57	0,92	6,67	0,97
T 101a-3	11,5	0,44	0,80	6,10	1,04
T 101a-4	10,4	0,55	0,77	5,03	1,11
T 102-1	14,6	0,72	0,73	8,02	1,10
T 102-2	11,8	0,66	1,10	8,50	1,33
T 102-3	12,2	0,75	1,20	8,79	1,12

Tabelle 12: F-Lage: Mikronährelemente
(Gesamtgehalte in mg/g T.S.)

Probefläche	Fe	Mn	Zn	Cu	B
T 83-1	2120	538	29	6,7	4,0
T 83-2	1540	520	28	4,2	7,0
T 94-1	1032	414	27	6,5	5,0
T 94-2	734	437	15	6,3	5,0
T 94-3	302	6000	20	7,2	4,0
T 94-4	4910	1058	40	11,0	7,0
T 204-5	887	324	11	4,3	6,0
T 204-6	1550	357	14	6,6	3,0
T 203-1	879	414	11	5,3	7,0
T 203-2	1000	315	10	4,1	7,0
T 203-3	1265	708	10	5,0	8,0
T 203-4	1860	585	10	6,4	6,0
T 101a-1	1680	931	26	10,7	8,0
T 101a-2	1001	740	55	11,8	9,0
T 101a-3	1026	531	21	14,5	9,0
T 101a-4	2250	772	27	11,3	11,0
T 102-1	2090	744	35	13,9	10,0
T 102-2	1375	1070	35	11,3	8,0
T 102-3	1005	807	29	10,6	5,0

Tabelle 13: Al-Gehalte (ug/g T.S.)

Probefläche	Nadel	Boden+)	L-Lage	F-Lage
T 83-1	1200	90	1480	4700
T 83-2	1225	91	1205	2960
T 94-1	1100	84	1000	2420
T 94-2	1000	55	870	1710
T 94-3	875	49	2260	1030
T 94-4	1100	114	1600	6490
T 204-5	1375	58	1430	2410
T 204-6	1225	46	1390	3500
T 203-1	1000	55	1000	1920
T 203-2	875	43	1100	2420
T 203-3	1000	57	1240	2790
T 203-4	1125	57	1520	4250
T 101a-1	875	107	770	2400
T 101a-2	875	92	710	1570
T 101a-3	925	98	790	1720
T 101a-4	875	94	690	2780
T 102-1	925	87	760	2260
T 102-2	1125	35	1140	3100
T 102-3	1075	53	940	2300

+) (Angaben in mg/g T.S.)

11. ANHANG

11.2. Pinus elliottii

Tabelle 14: Angaben zu den Probeflächen von Pinus elliottii

Bezirk	Bezeichnung der Probefläche		Bodentyp	Gestein	Vorherige Landnutzung
Passo Fundo (1)	T-24	A1	Diabas-latosol	Diabas	"campo" Landwirtschaft
		A2	"	"	
		A3	Diabas Ranker	"	
Ponte Alta do Norte (4)	P-71		Diabas-latosol	"	"campo" und Landwirtschaft
	P-80		"	"	
	P-76		"	"	
	P-78		"	"	
	P-Ar-2		Sandstein-latosol	Sandstein	
	P-Ar-1		Sandstein-latosol	"	
	P-79		Diabas latosol	Diabas	
	P-0		"	"	
	P-24		"	"	
	P-6		"	"	
	P-32		"	"	
	P-7		"	"	
	P-59		"	"	
	P-15		"	"	
	P-70		"	"	
	P-20		"	"	
	P-14		"	"	
Tres Barras (3)	T-75	A1	"Podzólico V. Amarelo"	Permischer Tonschiefer	"Campo" und Landwirtschaft
	T-75	A2	dränierter Gley		
	T-74	A3	"Podzólico V. Amarelo"		
Sao Francisco do Sul (2)	T-	A1	"Areias Quartzosas"	Sandige Sedimente	Küstenwald
	T-	A2			
	T-	A3			
Irati (5)	T-96	A1	Sandstein-latosol	Permischer Tonschiefer	"Campo" und Landwirtschaft
	T-96	A2	Gley		
	T-96	A3	dränierter Gley		
Ponta Grossa (6)	T-5	A1	Tonschiefer Ranker	Devonischer Tonschiefer Sandstein	"Campo"
	T-5	A2	"		
	T-6	A3	Sandstein latosol		

Tabelle 15: Meßdaten der Bestände (Alter: 8 Jahre)

Standort Bezeichnung			h_{100}(m)	DBH(m)
Passo Fundo	T 24	A1	10,3	15,80
		A2	10,7	18,40
		A3	9,6	16,30
		71	11,9	20,70
		80	10,6	19,00
		76	12,0	19,70
Ponte		78	11,3	20,30
		Ar-2	10,5	19,00
		Ar-1	11,2	19,80
Alta		79	10,7	18,90
		0	10,7	19,30
		24	12,1	20,60
do		06	12,6	16,80
		32	11,7	20,40
		07	11,4	20,20
Norte		59	10,4	19,50
		15	10,7	18,70
		70	11,2	20,10
		20	10,9	24,20
		14	11,8	20,70
	T 75	A1	12,6	21,60
Tres	T 75	A2	11,7	21,20
Barras	T 74	A3	12,7	22,90
São		A1	13,5	20,90
Francisco		A2	13,2	20,40
do Sul		A3	13,3	19,90
		A1	10,0	21,50
Irati	T 96	A2	8,5	14,90
		A3	11,4	20,50
Ponta	T 5	A1	13,4	20,40
Grossa	T 5	A2	12,5	20,60
	T 6	A3	13,9	21,30

Tabelle 16: Bodendaten: pH-Wert, Humusgehalt, C-Gehalt (Angaben in g/100 g T. S.

Standort Bezeichnung		Mineralboden				Organ. Auflage	
						L-Lage	F-Lage
		pH (H_2O)	pH($CaCl_2$)	C	Humus +)	C	C
Passo Fundo	A1	4,7	4,3	3,19	5,50	51	50
	A2	4,9	4,3	2,73	4,70	52	48
	A3	5,0	4,3	2,02	3,50	50	47
Ponte Alta do Norte	71	4,6	3,8	6,00	10,30	58	46
	80	4,7	3,9	4,67	8,00	52	50
	76	4,5	3,9	5,22	9,00	52	52
	78	4,6	4,0	2,88	4,90	52	52
	Ar-2	4,4	4,0	5,17	8,90	52	49
	Ar-1	4,6	4,0	2,87	4,90	52	46
	79	4,8	4,1	4,61	7,90	52	52
	0	4,3	3,8	5,05	8,70	50	53
	24	4,5	3,9	3,73	6,40	52	52
	06	4,6	4,0	3,02	5,20	53	53
	32	4,5	3,9	2,22	3,80	52	48
	07	4,4	3,7	4,26	7,30	53	49
	59	4,6	4,0	5,18	8,90	50	47
	15	4,5	3,7	3,60	6,20	51	50
	70	4,6	3,9	2,03	3,50	50	48
	20	4,7	3,9	4,29	7,40	52	68
	14	4,6	4,0	3,60	6,20	50	48
Tres Barras	A1	4,5	4,0	4,75	8,20	51	49
	A2	4,0	3,7	7,40	12,70	51	48
	A3	4,7	4,2	4,44	7,60	50	49
Sáo Francisco do Sul	A1	4,7	4,1	1,49	2,60	50	48
	A2	3,8	3,1	2,56	4,40	50	51
	A3	4,3	3,8	1,32	2,30	52	44
Irati	A1	4,6	4,0	1,73	3,00	52	51
	A2	4,7	4,1	1,41	2,40	53	52
	A3	4,6	3,9	4,27	7,30	53	43
Ponta Grossa	A1	4,3	3,8	4,14	7,10	53	50
	A2	4,3	3,9	2,92	5,00	54	51
	A3	4,7	4,1	2,83	4,90	54	50

+) (Humus = C x 1,72)

Tabelle 17: Nadelanalytische Daten: Makronährelemente
(Gehalte in mg/g T.S. Nadeln)

Probefläche		N	P	K	Ca	Mg
Passo Fundo	A1	14,80	1,51	10,28	2,10	1,36
	A2	13,50	1,78	11,75	1,83	1,27
	A3	13,00	1,81	10,73	2,43	1,50
Ponte Alta do Norte	71	13,20	1,78	5,90	1,55	1,35
	80	13,80	1,31	8,10	2,43	1,38
	76	14,50	1,40	8,83	2,60	1,43
	78	14,10	1,48	7,90	2,60	1,39
	Ar-2	12,50	1,55	6,20	2,75	1,47
	Ar-1	12,70	1,55	7,15	1,45	1,18
	79	15,00	1,50	9,38	3,53	1,67
	0	14,70	1,73	8,00	1,73	1,33
	24	14,40	1,90	7,80	2,43	1,34
	06	13,80	1,69	6,35	2,68	1,36
	32	13,40	1,25	6,78	1,70	1,20
	07	15,10	1,46	7,25	2,48	1,36
	59	15,10	1,12	7,48	2,76	1,07
	15	15,30	1,64	4,60	2,50	1,36
	70	13,90	1,10	6,55	3,20	1,14
	20	14,00	1,73	8,15	1,80	1,35
	14	13,50	1,75	8,05	2,20	1,28
Tres Barras	A1	12,20	1,37	6,83	1,79	1,20
	A2	14,20	1,37	6,43	2,64	1,33
	A3	13,60	1,36	9,10	2,52	1,33
Sáo Francisco do Sul	A1	14,90	1,36	5,00	3,42	1,46
	A2	14,90	1,33	4,13	2,90	1,55
	A3	14,50	1,23	3,85	3,02	1,54
Irati	A1	13,00	1,36	7,25	1,35	1,17
	A2	12,10	0,82	5,90	0,45	0,58
	A3	11,80	1,15	5,65	1,07	0,96
Ponta Grossa	A1	15,80	1,37	8,65	1,50	1,18
	A2	15,90	1,37	8,33	1,23	1,12
	A3	15,70	1,37	5,23	1,57	1,35

Tabelle 18: Nadelanalytische Daten: Mikronährelemente (Gehalte in ug/g T.S. Nadeln)

Probefläche		Fe	Mn	Zn	Cu	B
Passo Fundo	A1	71	353	47	13,0	21
	A2	57	418	50	13,0	28
	A3	63	311	52	11,0	19
Ponte Alta do Norte	71	80	283	52	9,6	29
	80	110	343	62	8,5	28
	76	85	336	75	9,4	29
	78	100	528	67	10,5	28
	Ar-2	68	400	45	8,8	25
	Ar-1	68	403	35	8,1	24
	79	87	340	61	10,6	29
	0	123	308	50	10,7	33
	24	83	355	65	10,3	25
	06	83	618	65	12,0	33
	32	60	355	55	7,6	21
	07	113	533	75	11,0	27
	59	95	395	62	6,6	28
	15	170	515	70	11,0	29
	70	68	600	67	6,6	31
	20	115	525	62	8,0	33
	14	119	420	67	12,8	20
Tres Barras	A1	56	250	44	9,0	16
	A2	53	254	39	6,4	19
	A3	49	209	64	7,6	24
Sáo Francisco do Sul	A1	110	435	57	5,9	25
	A2	80	85	52	4,3	22
	A3	88	190	52	4,7	28
Irati	A1	58	355	45	10,4	17
	A2	60	146	20	6,2	12
	A3	58	230	30	7,2	11
Ponta Grossa	A1	70	200	40	6,6	16
	A2	78	316	35	6,9	17
	A3	65	413	45	6,6	22

Tabelle 19: Mineralboden: Makronährelemente; (Gesamtgehalte (mg/g T.S. Boden))

Probefläche		N	P+)	K	Ca	Mg
Passo Fundo	A1	2,10	721	1,60	1,60	2,26
	A2	1,90	671	1,50	1,00	1,97
	A3	1,40	358	1,45	1,20	1,90
Ponte Alta do Norte	72	2,00	476	0,65	0,50	0,97
	80	2,50	671	0,70	0,50	2,16
	76	2,50	714	0,80	1,00	1,72
	78	1,50	1048	0,50	0,80	1,90
	Ar-2	2,90	675	0,78	0,60	1,34
	Ar-1	1,80	543	0,55	0,60	1,10
	79	2,80	724	0,70	0,50	1,92
	0	3,00	590	0,75	0,50	1,92
	24	2,40	676	0,93	0,55	1,85
	06	1,80	828	0,70	0,90	1,86
	32	1,50	410	0,90	0,50	1,89
	07	2,50	676	0,65	1,00	1,54
	59	2,80	771	0,76	1,05	2,00
	15	2,50	704	1,00	0,80	1,80
	70	1,60	771	0,95	0,75	1,82
	20	2,70	743	0,73	0,60	2,02
	14	2,30	667	0,40	0,75	1,93
Tres Barras	A1	2,80	619	1,00	0,70	1,65
	A2	4,80	629	2,12	0,60	1,86
	A3	3,30	619	5,73	0,22	2,70
São Francisco do Sul	A1	1,00	171	1,35	0,12	0,54
	A2	1,40	133	1,03	0,60	0,15
	A3	0,70	105	0,43	0,50	0,25
Irati	A1	1,00	210	0,27	0,75	0,38
	A2	0,80	114	0,24	1,08	0,35
	A3	2,30	343	0,67	1,70	0,65
Ponta Grossa	A1	2,40	990	14,00	1,20	2,90
	A2	1,70	772	10,00	1,20	2,45
	A3	1,50	505	1,72	1,00	1,20

+) Angaben in ug/g

Tabelle 20: Mineralboden: Gesamtgehalte der Mikronährelemente (Gehalte in ug/g T. S.)

Probefläche		Fe+)	Mn	Zn	Cu
Passo Fundo	A1	89	910	150	80
	A2	85	1340	120	75
	A3	104	1310	150	75
Ponte Alta do Norte	71	52	275	50	60
	80	98	620	80	125
	76	89	470	70	115
	78	108	770	75	117
	Ar-2	83	410	70	90
	Ar-1	62	400	60	70
	79	107	550	70	110
	0	69	540	60	75
	29	87	490	70	70
	06	122	730	95	130
	32	50	540	50	55
	07	88	490	70	95
	59	170	590	80	95
	15	75	590	85	105
	70	91	1150	70	100
	20	100	530	90	205
	14	98	840	70	105
Tres Barras	A1	61	195	75	70
	A2	24	150	60	60
	A3	70	430	60	55
São Francisco do Sul	A1	15	200	30	25
	A2	5	60	10	10
	A3	6	55	10	10
Irati	A1	25	100	25	25
	A2	15	33	25	17
	A3	18	70	30	30
Ponta Grossa	A1	51	110	30	30
	A2	63	140	65	40
	A3	47	180	60	40

+) (Angaben in mg/g T. S. Boden)

Tabelle 21: L-Lage: Makronährelemente
(Gesamtgehalte in mg/g T. S.)

Probefläche		N	P	K	Ca	Mg
Passo	A1	4,50	0,37	1,99	7,32	0,98
Fundo	A2	4,10	0,27	1,28	7,46	0,80
	A3	5,40	0,45	1,59	10,58	1,44
	71	7,90	0,68	0,54	6,77	0,90
	80	6,30	0,65	0,96	5,78	1,10
Ponte	76	5,60	0,77	1,23	5,50	1,10
Alta	78	4,90	0,60	0,64	6,49	1,00
do	Ar-2	5,30	0,42	0,50	7,29	1,05
Norte	Ar-1	4,50	0,45	0,40	4,57	0,80
	79	5,40	0,49	0,80	6,86	1,20
	0	9,50	1,06	0,52	2,94	0,60
	24	4,40	0,45	0,70	5,00	0,80
	06	8,00	0,90	0,72	3,23	0,84
	32	6,70	0,66	0,71	5,90	0,80
	07	6,60	0,60	0,70	5,48	1,02
	59	8,70	1,02	0,75	6,90	1,10
	15	5,10	0,24	0,30	7,97	1,09
	70	8,20	0,79	0,70	13,88	2,20
	20	6,50	0,41	0,87	5,14	1,20
	14	6,60	0,85	0,74	6,05	0,94
Tres	A1	7,40	0,33	1,33	7,24	0,99
Barras	A2	5,70	0,34	0,72	7,26	1,03
	A3	5,10	0,33	0,69	8,89	0,98
São	A1	7,90	0,62	1,70	8,00	1,56
Francisco	A2	8,70	0,56	1,55	7,00	1,82
do Sul	A3	5,70	0,18	0,57	7,05	1,37
	A1	4,50	0,14	0,50	5,10	0,90
Irati	A2	11,00	0,09	0,23	1,80	0,33
	A3	3,30	0,51	0,23	4,10	0,55
Ponta	A1	6,30	0,17	0,83	8,50	1,21
Grossa	A2	6,20	0,35	1,32	4,15	0,82
	A3	6,40	0,29	0,46	4,91	1,06

Tabelle 22: L-Lage: Mikronährelemente
(Gesamtgehalte in ug/g T.S.)

Probefläche		Fe	Mn	Zn	Cu	B
Passo Fundo	A1	281	751	34	10,0	11,0
	A2	306	1406	49	9,0	10,0
	A3	399	873	78	8,1	12,0
Ponte Alta do Norte	71	1250	670	27	5,0	1,0
	80	669	645	21	12,0	5,0
	76	179	564	31	18,0	1,0
	78	204	1006	32	7,5	1,0
	Ar-2	663	789	12	4,0	8,0
	Ar-1	1110	822	21	5,6	2,5
	79	181	672	34	3,0	10,0
	0	970	603	14	11,4	3,0
	24	192	623	15	15,0	2,0
	06	1560	1065	33	14,0	2,0
	32	578	1023	34	4,0	1,0
	07	1740	1335	29	3,0	7,0
	59	673	533	26	4,0	2,0
	15	613	1189	26	2,5	4,0
	70	2000	2299	57	5,5	2,0
	20	251	1070	24	10,0	2,0
	14	5740	1091	37	7,0	2,0
Tres Barras	A1	372	515	39	5,0	6,0
	A2	405	716	27	6,0	4,0
	A3	324	522	43	7,5	2,0
São Francisco do Sul	A1	373	770	40	5,0	2,0
	A2	207	124	48	4,0	9,0
	A3	227	276	22	5,0	9,0
Irati	A1	324	916	14	7,0	7,0
	A2	190	276	8	2,0	7,0
	A3	197	445	9	11,0	11,0
Ponta Grossa	A1	312	628	11	7,0	9,0
	A2	510	605	13	9,0	5,0
	A3	387	813	13	12,0	7,0

Tabelle 23: F-Lage: Makronährelemente
(Gesamtgehalte in mg/g T. S.)

Probefläche		N	P	K	Ca	Mg
Passo Fundo	A1	7,70	0,73	1,01	11,48	2,45
	A2	5,80	0,61	0,74	10,26	1,96
	A3	9,10	0,62	1,25	12,42	3,23
Ponte Alta do Norte	71	10,30	1,07	0,44	2,99	0,36
	80	8,10	0,94	0,70	5,46	0,94
	76	7,00	0,91	1,07	6,01	0,98
	78	6,40	0,96	0,67	8,93	1,01
	Ar-2	11,00	0,34	0,92	8,07	1,12
	Ar-1	6,70	0,55	0,60	5,70	0,80
	79	7,70	0,69	0,70	7,72	1,16
	0	5,10	0,49	0,67	3,65	0,94
	24	5,60	0,83	0,65	5,89	0,80
	06	6,00	0,62	0,92	5,73	0,99
	32	7,60	0,101	0,57	7,48	0,81
	07	8,30	0,88	0,64	4,53	0,79
	59	9,00	1,00	0,60	7,01	1,12
	15	9,10	0,51	0,32	8,67	0,90
	70	10,30	1,19	0,74	11,12	2,75
	20	5,90	0,53	0,66	5,56	1,11
	14	8,00	1,11	0,64	4,71	0,82
Tres Barras	A1	13,20	0,58	0,93	9,17	1,13
	A2	10,30	0,62	0,54	5,19	0,83
	A3	9,90	0,67	0,64	5,62	0,81
São Francisco do Sul	A1	11,10	1,06	1,03	5,67	1,10
	A2	11,90	1,83	0,65	2,78	0,64
	A3	10,80	0,43	0,70	7,10	0,94
Irati	A1	7,30	0,30	0,46	6,33	1,05
	A2	7,20	0,22	0,27	3,10	0,45
	A3	3,90	0,57	0,35	5,23	0,42
Ponta Crossa	A1	10,20	0,80	1,22	11,34	0,82
	A2	8,70	0,47	0,88	5,75	0,61
	A3	8,10	0,52	0,48	4,22	0,37

Tabelle 24: F-Lage: Mikronährelemente
(Gesamtgehalte in ug/g T. S.)

Probefläche		Fe +)	Mn	Zn	Cu	B
Passo Fundo	A1	2110	1141	31	6,1	8,0
	A2	2720	1307	42	5,0	9,0
	A3	3475	1106	84	7,0	9,0
Ponte Alta do Norte	71	4920	431	16	4,2	1,0
	80	2460	695	24	2,0	6,0
	76	360	773	34	4,5	1,0
	78	980	1386	43	5,0	4,0
	Ar-2	291	635	12	6,0	7,0
	Ar-1	4490	1041	36	6,0	8,0
	79	1260	790	39	4,0	9,0
	0	146	551	15	3,5	4,0
	24	463	911	17	17,0	2,0
	06	371	1044	34	12,0	3,0
	32	1980	1111	38	6,0	4,0
	06	4100	1251	27	7,5	7,0
	59	3850	622	31	5,0	4,0
	15	2560	1268	33	10,0	3,0
	70	5440	3000	70	8,5	4,0
	20	821	1263	26	9,0	2,0
	14	4100	1251	27	5,0	6,0
Tres Barras	A1	1370	776	49	4,0	7,0
	A2	1410	777	28	7,1	4,0
	A3	1210	582	43	8,5	4,0
Sáo Francisco do Sul	A1	1540	708	47	4,2	6,0
	A2	527	710	41	5,0	6,0
	A3	1110	716	27	6,0	6,0
Irati	A1	1110	1131	18	11,1	6,0
	A2	439	390	11	5,0	10,0
	A3	367	550	12	9,0	7,0
Ponta Grossa	A1	2600	922	20	12,3	6,0
	A2	1700	749	19	5,0	10,0
	A3	3580	742	17	14,5	7,0

+) (Angaben in mg/g T. S.)

Tabelle 25: Al-Gehalte
(ug/g T. S.)

Probefläche		Nadel	Boden+)	L-Lage	F-Lage
Passo	A1	563	118	1200	3010
Fundo (1)	A2	588	94	1170	5390
	A3	612	91	1410	4170
	71	525	42	2650	9190
	80	600	96	1570	4290
Ponte	76	675	90	1030	1310
Alta	78	800	103	1040	2200
do	Ar-2	575	110	1510	1390
Norte	Ar-1	550	74	2390	7480
	79	550	100	930	2520
	0	675	81	2010	890
(4)	24	600	97	880	1470
	06	475	110	2500	1100
	32	512	50	1550	4260
	07	550	88	3080	7000
	59	575	92	1540	6790
	15	675	102	1540	4230
	70	525	69	3030	6530
	20	725	95	1060	1870
	14	612	87	6600	7030
Tres	A1	612	129	950	2640
Barras	A2	563	112	1590	3500
	A3	388	116	1260	4390
São	A1	950	17	1200	2900
Francisco	A2	850	5	1330	2000
do Sul	A3	825	8	1170	1730
Irati	A1	575	47	1075	2670
	A2	438	30	700	1060
	A3	650	68	980	1390
Ponta	A1	800	121	1270	5330
Grossa	A2	750	135	1130	4000
	A3	750	138	1600	6090

+) (Angaben in mg/g T. S.)

LEBENSLAUF

Ich, Carlos Bruno Reissmann, wurde am 4. April 1945 als Sohn des Heinz Reissmann-Schreiner - und seiner Ehefrau Alma Elza Altmann Reissmann in Pôrto Uniao, Santa Catarina, Brasilien geboren. Nach dem Besuch der Volksschule in Pôrto Uniao von 1953 bis 1956, besuchte ich das Gymnasium von 1957 bis 1962. Von 1963 bis 1966 besuchte ich die Technische Oberschule für Buchhaltung in Uniao da Vitória. Danach studierte ich an der Forstfakultät in Curitiba, wo ich mein Studium als Forstingenieur abschloß.

1972 trat ich in die Universidade Federal do Paraná ein, wo ich als Leiter der Versuchsstationen des Agrarwissenschaftlichen Sektors angestellt wurde. In diesem selben Jahr nahm ich noch an einem Spezialkurs für forstliche Betriebswissenschaft teil. Ab 1973 besuchte ich den Postgraduiertenkurs an der Forstfakultät der Universidade Federal do Paraná. Im Dezember 1976 beendete ich das Magisterstudium. Das Thema meiner Arbeit stammte aus dem Gebiet der Pflanzenernährung und lautete: "Jahresgang der Nährelementspiegelwerte bei Araukaria angustifolia".

Von 1974 bis 1976 bin ich als Counterpart des Universitätspartnerschaftsprojektes Freiburg/Curitiba tätig gewesen.

1975 schied ich aus der Stelle der Leitung der Versuchsstationen aus und bewarb mich um die Stelle als "Auxiliar de onsino" auf dem Gebiet der Pflanzenernährung. Auf diesem Gebiet erhielt ich 1977 die Stelle als Assistenzprofessor.

Ab Oktober 1977 begann ich als Stipendiat des Deutschen Akademischen Austauschdienstes meine Promotion im Institut für Bodenkunde und Waldernährung an der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg i. Br.